

УДК 577.3

ИНГИБИРУЮЩАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИПИДНОГО КОМПОНЕНТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОЛЯРНОСТИ ЭЛЮЕНТА

© 2021 г. Л.Н. Шишкина, Л.И. Мазалецкая, А.Н. Смирнова, В.О. Швыдкий

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, 119334, Москва, ул. Косыгина, 4

E-mail: shishkina@sky.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 26.01.2021 г.

Принята к публикации 05.02.2021 г.

Изучены антиоксидантные свойства, спектральные характеристики и состав липидов, выделенных из цветков календулы и плодов облепихи и из их 50%-х водно-пропиленгликолевых экстрактов. Выявлены существенные количественные различия ингибирующей эффективности, количественного соотношения фракций липидов и присутствия в их хлороформном растворе биологически активных веществ в зависимости от полярности элюентов, что обуславливает способность липидного компонента растительных объектов принимать участие в регуляции окисления на разных стадиях процесса. Это подтверждено анализом кинетических кривых накопления пероксидов с помощью компьютерного пакета программ KINS и математической обработкой УФ-спектров растворов липидов по методу Гаусса.

Ключевые слова: ингибирующая эффективность, липиды, экстракты, низкотемпературное окисление, УФ-спектрофотометрия, компьютерное моделирование

DOI: 10.31857/S000630292103008X

Наличие в растениях таких биологически активных веществ (БАВ), как флавоноиды и каротиноиды, рассматривается в качестве основной причины их фармакологического действия, которое обычно связывают с антиоксидантными свойствами БАВ [1–5]. Существенно более низкая токсичность природных соединений для организма по сравнению с синтетическими препаратами обуславливает необходимость детального изучения механизма антиоксидантных свойств компонентов растений с целью поиска среди них новых источников для создания фармакологических средств. Антиоксиданты (АО) принимают активное участие в регуляции окислительных процессов в любых системах, однако их эффективность существенно зависит как от концентрации кислорода, так и от состава субстрата окисления.

Основными субстратами окисления в биологических системах являются фосфолипиды (ФЛ), являющиеся одними из главных структурных компонентов мембран и играющих важную роль в регуляции метаболизма в организме [6]. Для

анализа антиоксидантных свойств различных компонентов клеток, АО и их смесей одним из наиболее используемых в качестве модельного субстрата окисления является метилолеат. В биологических мембранах процессы перекисного окисления липидов преимущественно протекают в диффузионном режиме, что позволяет рассматривать модель автоокисления метилолеата в тонком слое как адекватную модельную систему для изучения участия компонентов различных объектов в регуляции перекисного окисления липидов [7, 8].

Для приготовления экстрактов из различных растительных объектов, в составе которых присутствуют БАВ и общие липиды [9], преимущественно используются водные смеси различных спиртов с разным соотношением элюентов. Детальному анализу состава ФЛ растений и ряда растительных экстрактов посвящены лишь единичные исследования последних лет [10–14]. Несмотря на то что цветки календулы и плоды облепихи широко применяются в фармакологии, сведения о детальном составе их ФЛ и влиянии полярности элюентов на физико-химические свойства липидов экстрактов единичны [14].

Целью работы явилось оценить участие липидного компонента растений на разных стадиях

Сокращения: БАВ – биологически активные вещества, АО – антиоксиданты, ФЛ – фосфолипиды, ВПГ – водно-пропиленгликолевый, ФХ – фосфатидилхолин, ФЭ – фосфатидилэтанолламин.

процесса окисления модельного субстрата на основании сравнительного анализа антиоксидантных свойств, наличия БАВ и состава липидов цветков календулы и плодов облепихи в зависимости от полярности элюента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись липиды, выделенные из свежесобранных в Московской области цветков календулы лекарственной (*Calendula officinalis* L.) и замороженных плодов облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.) и их 50%-х водно-пропиленгликолевых (ВПГ) экстрактов. Методика приготовления ВПГ экстрактов подробно изложена в работе [14].

Взвешенные цветки календулы и плоды облепихи растирали в дистиллированной воде в соотношении 1 г сырой массы : 1.95 мл дистиллированной воды. Липиды из растительных объектов и их экстрактов извлекали по методу Фолча в модификации Кейтса [15]. Качественный и количественный состав ФЛ определяли методом тонкослойной хроматографии [16], используя силикагель типа Н (Sigma, США), стеклянные пластинки размером 90 × 120 мм и смесь хлороформ : метанол : ледяная уксусная кислота : дистиллированная вода в объемном соотношении 12.5 : 7.5 : 2 : 1 в качестве мобильной фазы. Проявление хроматограмм проводили в парах йода. Количественный анализ состава ФЛ после удаления пятен с пластинки и сжигания до неорганического фосфата хлорной кислотой проводили на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ («ЭКРОС», Россия) при длине волны 815 нм по образованию фосфомолибденового комплекса в присутствии аскорбиновой кислоты. Для калибровки использовали однозамещенный фосфорнокислый калий марки «ос. ч.». Для каждой пробы анализировали не менее четырех-пяти хроматографических дорожек. Содержание стеринов определяли по методу, описанному в работе [17], на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ при длине волны 625 нм. Помимо количественного содержания отдельных фракций ФЛ оценивали также обобщенные показатели состава липидов: доля ФЛ (%) и стеринов (%) в составе общих липидов; отношение фосфатидилхолин/фосфатидилэтаноламин (ФХ/ФЭ), которое позволяет судить о структурном состоянии липидного компонента [18], и отношение сумм более легкоокисляемых и более трудноокисляемых фракций ФЛ ($\Sigma\text{ЛОФЛ}/\Sigma\text{ТОФЛ}$), характеризующее способность липидов к окислению [18]. Последнее вычисляли по формуле: $\Sigma\text{ЛОФЛ}/\Sigma\text{ТОФЛ} = (\text{ФИ} + \text{ФС} + \text{ФЭ} + \text{КЛ} + \text{ФК})/(\text{ЛФХ} + \text{СЛ} + \text{ФХ})$, где ФИ – фосфатидилинозит, ФС – фосфатидилсерин, КЛ – кардиолипин, ФК – фосфатидная кислота, ЛФХ – лизоформы фосфолипидов, СЛ – сфинголипиды.

Антиоксидантные свойства липидов определяли по их способности тормозить автоокисление метилолеата (RH) в тонком слое при 323 К в диффузионной области, когда концентрация кислорода обусловлена скоростью его диффузии в слой метилолеата. Для этого липиды после отгонки хлороформа растворяли в метилолеате в диапазоне концентраций от $7.1 \cdot 10^{-4}$ до $3.57 \cdot 10^{-3}$ моль/л (0.5–2.5 мг/мл). Процесс окисления контролировали по накопленному гидропероксиду (ROOH), концентрацию которых определяли методом йодометрического титрования (ошибка измерения не превышала 5%). За период индукции (τ) принимали время, рассчитанное из кинетических кривых накопления ROOH от начала опыта до точки пересечения линейных участков кинетической кривой, соответствующих начальной скорости окисления в периоде индукции и максимальной скорости накопления пероксидов [19]. Кинетические кривые анализировали с помощью пакета компьютерных программ KINS [20].

Ингибирующую эффективность оценивали по разности величин периода индукции окисления RH в присутствии и отсутствие исследуемых добавок ($\Delta\tau$), отнесенной к периоду индукции окисления самого RH (τ_{RH}), Антирадикальную активность липидного экстракта цветков календулы, т.е. константу скорости его взаимодействия с пероксирадикалами (k_7), определяли на модели инициированного динитрилом азоизомасляной кислоты окисления метилолеата при 333 К при скорости инициирования $W_i = 1 \cdot 10^{-7}$ моль \cdot л $^{-1}$ \cdot с $^{-1}$. Метилолеат в смеси с инертным растворителем хлорбензолом (1 : 1) и растворенным инициатором термостатировали, после чего добавляли раствор липидного экстракта цветков календулы в метилолеате. Процесс окисления контролировали волюмометрическим методом по поглощению кислорода. Детали анализа кинетических характеристик липидного экстракта даны в работе [19].

Дифференциальные УФ-спектры растворов липидов в хлороформе регистрировали на спектрофотометре Shimadzu UV-1700 PharmaSpec (Shimadzu, Япония) в диапазоне длин волн от 250 до 500 нм при разбавлении исходных растворов хлороформом. Полученные спектры подвергали математической обработке по методу Гаусса в программе Excel solver путем минимизации суммы квадратов разности между экспериментальным и расчетным спектрами, соблюдая следующие условия: совпадение контура исходного спектра с расчетным после аппроксимации на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-5}$.

Экспериментальные данные обрабатывали стандартными методами вариационной статистики, используя программный продукт MS Excel и пакет компьютерных программ KINS [20]. Достоверность различий оценивали по t -критерию

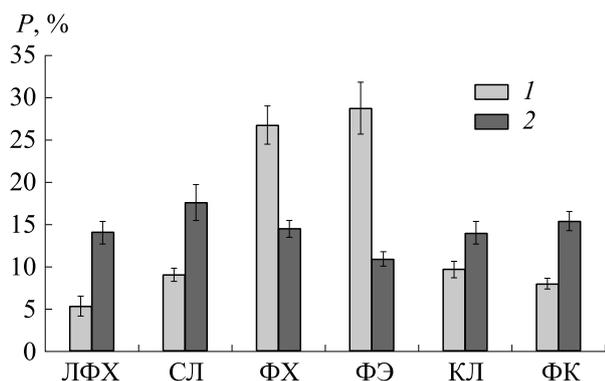


Рис. 1. Относительное содержание ряда фракций фосфолипидов при выделении липидов из цветков календулы (1) и их 50%-х водно-пропиленгликолевых экстрактов (2).

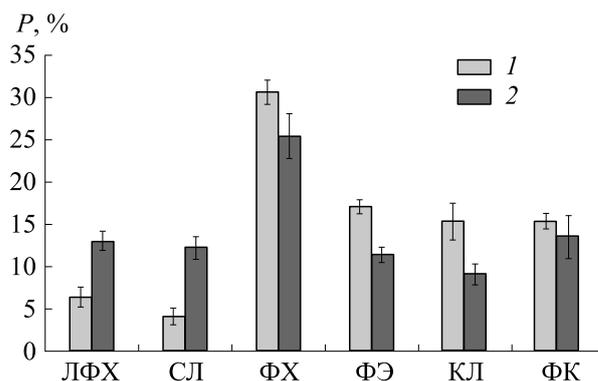


Рис. 2. Относительное содержание ряда фракций фосфолипидов при выделении липидов из плодов облепихи (1) и их 50%-х водно-пропиленгликолевых экстрактов (2).

Стьюдента [21]. В таблице и на рисунках данные представлены в виде средних арифметических значений с указанием их средних квадратичных ошибок ($M \pm m$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ состава липидов, выделенных из исследованных объектов, выявил существенные различия как доли ФЛ и стериннов в составе общих липидов, так и количественного соотношения фракций ФЛ в самих цветках календулы и плодах облепихи и их 50%-х ВПГ-экстрактах. Так, относительное содержание ФЛ в составе общих липидов из цветков календулы снижается с $24.6 \pm 2.4\%$ ($n = 8$) до $2.6 \pm 0.6\%$ ($n = 13$) в липидах их ВПГ-экстрактов, а аналогичный показатель состава общих липидов плодов облепихи падает с $13.5 \pm 2.9\%$ ($n = 7$) до $2.6 \pm 0.15\%$ ($n = 13$). При этом относительно невысокая доля стериннов в составе общих липидов цветков календулы ($3.1 \pm 1.7\%$) и плодов облепихи ($0.83 \pm 0.34\%$) в липидах обоих ВПГ-экстрактов уменьшается до следовых количеств [14]. Следовательно, предварительная экстракция растительного сырья полярным элюентом (для пропиленгликоля $\mu = 2.2$ D) приводит к уменьшению доли полярных фракций липидов в 5.2–9.5 раза.

Столь же существенные изменения наблюдаются и в количественном соотношении фракций ФЛ исследуемых объектов, что иллюстрируют

данные, представленные на рис. 1 и 2. Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что в липидах, выделенных из 50%-х ВПГ-экстрактов, достоверно повышена доля лизоформ ФЛ в 2.6 ($p < 0.001$) и 2.0 ($p < 0.001$) раза и сфинголипидов в 1.9 ($p < 0.01$) и 3.0 ($p < 0.001$) раза в ФЛ цветков календулы и плодов облепихи соответственно. В то же время относительное содержание ФЭ и ФХ в ФЛ цветков календулы в 1.8–1.9 ($p < 0.001$) раза превышает аналогичный показатель в составе ФЛ его ВПГ-экстракта, а предварительная обработка плодов облепихи полярным элюентом уменьшает долю этих фракций ФЛ лишь на 20–50%. Разнонаправленные изменения относительного содержания таких более легкоокисляемых фракций ФЛ, как кардиолипиды и фосфатидная кислота, наблюдаются в липидах, выделенных из исходных растительных объектов, по сравнению с липидами из их ВПГ-экстрактов (рис. 1 и 2). Интересно отметить, что суммарные доли «фосфатидилинозит + фосфатидилсерин» в ФЛ всех изученных объектов достаточно близки и варьируют в пределах 12.0–16.1%.

Столь существенные изменения количественного соотношения фракций ФЛ обуславливают и изменения обобщенных показателей состава ФЛ, величины которых представлены в таблице. Видно, что липиды из ВПГ-экстрактов характеризуются более высоким значением отношения

Обобщенные показатели состава фосфолипидов

Показатель	1	Экстракт 1	2	Экстракт 2
ФХ/ФЭ	0.938 ± 0.058	1.328 ± 0.059	1.831 ± 0.054	2.245 ± 0.130
(Σ ЛОФЛ/ Σ ТОФЛ)	1.431 ± 0.088	1.173 ± 0.063	1.463 ± 0.084	0.998 ± 0.059

Примечание. Представлены соотношения сумм более легкоокисляемых и более трудноокисляемых фракций ФЛ (Σ ЛОФЛ/ Σ ТОФЛ) и отношение фракций фосфатидилхолин/фосфатидилэтанолламин (ФХ/ФЭ) в составе фосфолипидов цветков календулы (1) и плодов облепихи (2) и их 50%-х ВПГ-экстрактов (экстракты 1 и 2 соответственно).

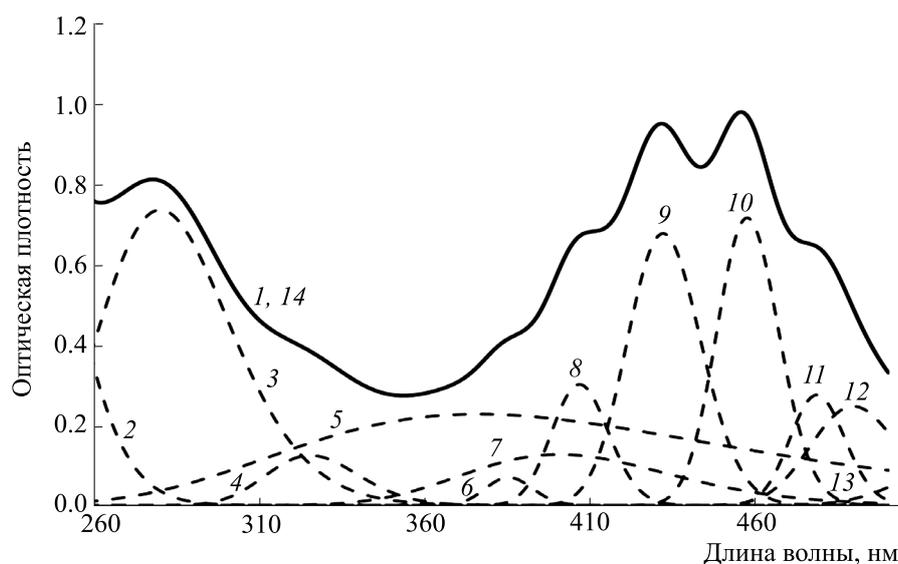


Рис. 3. УФ-спектры хлороформных растворов липидов из цветков календулы и их гауссианы (концентрация липидов $5.1 \cdot 10^{-5}$ моль/л): 1, 14 – исходный и расчетный спектры, 2 – 238.1 нм, 3 – 280.2 нм, 4 – 325.5 нм, 5 – 376.2 нм, 6 – 385.3 нм, 7 – 400.5 нм, 8 – 406.7 нм, 9 – 431.9 нм, 10 – 457.3 нм, 11 – 478.3 нм, 12 – 489.3 нм, 13 – 529.1 нм.

ФХ/ФЭ и более низкой величиной соотношения $\Sigma\text{ЛОФЛ}/\Sigma\text{ТОФЛ}$. Следовательно, предварительная обработка растительного сырья 50%-м ВПГ обуславливает увеличение жесткости липидного компонента и уменьшение его способности к окислению.

Как известно, использование хлороформа в качестве растворителя в УФ-спектрофотометрии позволяет выявить наличие в пробе компонентов, характеризующихся максимумами полос поглощения в области $\lambda > 250$ нм. Сравнительный анализ УФ-спектров и их гауссиан хлороформных растворов липидов из цветков календулы и плодов облепихи и липидов из их ВПГ-экстрактов показал определенные различия величины максимумов полос поглощения в области флавоноидов в диапазоне λ от 250 нм до 380 нм. Следовательно, предварительная экстракция сырья полярным элюентом влияет на распределение флавоноидов. Отсутствие полос поглощения в области $\lambda > 400$ нм, характерных для растворов каротиноидов в хлороформе [22], свидетельствует об отсутствии каротиноидов в липидах, выделенных из ВПГ-экстрактов исследованных объектов. Эти выводы четко следуют из данных, представленных на рис. 3 и 4 на примере липидов, выделенных из цветков календулы и их ВПГ-экстрактов.

Изучение антиоксидантных свойств липидов, выделенных из цветков календулы и плодов облепихи, показало, что они способны тормозить автоокисление метилолеата, а период индукции окисления линейно зависит от количества введенной добавки (рис. 5). Это свидетельствует о

том, что содержащиеся в липидных экстрактах данных объектов компоненты, принимающие участие в процессе окисления, в течение периода индукции преимущественно взаимодействуют с пероксирадикалами. Необходимо отметить, что ингибирующая эффективность ($\Delta\tau/\tau_{RH}$) экстрактов липидов из цветков календулы в 1.9 ± 0.2 ($n = 6$) раза превышает аналогичную величину для липидных экстрактов из плодов облепихи. Полученные данные позволяют предположить, что торможение процесса окисления обусловлено содержащимися в липидах АО, наличие которых подтверждает анализ УФ-спектров (рис. 3). Количественная оценка содержания АО и их антирадикальной активности (k_7) была проведена для более эффективного липидного экстракта из цветков календулы. Установлено, что присутствие добавки тормозит процесс инициированного окисления метилолеата, из величины периода индукции и начальной скорости окисления которого рассчитана концентрация АО, равная $4.35 \cdot 10^{-5}$ моль/л, и проведена оценка параметра ингибирования $k_7/\sqrt{k_6} = 65 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, где k_6 – это константа скорости квадратичной гибели пероксирадикалов метилолеата. Полученное значение параметра $k_7/\sqrt{k_6}$ соответствует данным литературы о высокой антирадикальной активности флавоноидов [7].

Несмотря на более низкую способность к окислению относительно липидов из исходных растительных объектов (таблица) и наличие в липидах из экстрактов БАВ (рис. 4), липиды из их ВПГ-экстрактов практически не влияют на про-

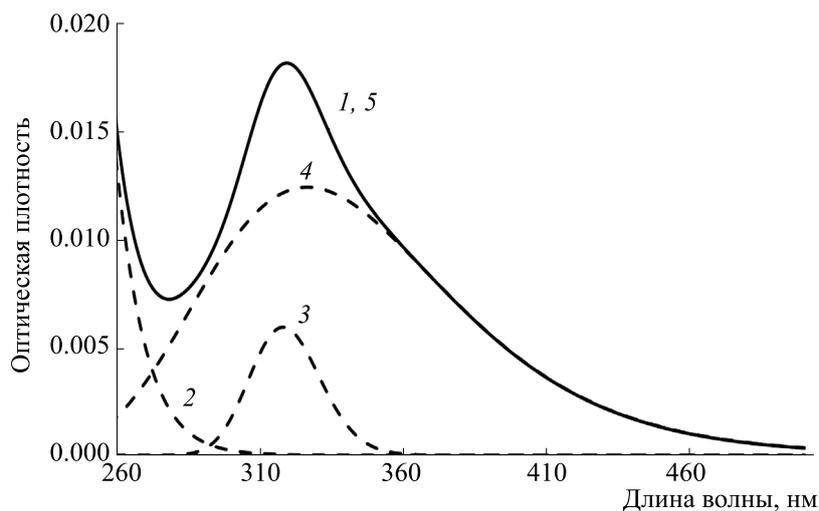


Рис. 4. УФ-спектры хлороформных растворов липидов, выделенных из 50%-х водно-пропиленгликолевых экстрактов цветков календулы и их гауссианы (концентрация липидов 1.1×10^{-3} моль/л): 1, 5 – исходный и расчетный спектры, 2 – 205.1 нм, 3 – 318.4 нм, 4 – 326.8 нм.

цесс окисления. Так, липиды из экстрактов плодов облепихи обладают слабой проокислительной активностью ($\Delta\tau/\tau_{RH} = -0.035 \pm 0.09$, $n = 6$), а липиды из ВПГ экстрактов цветков календулы низкой ингибирующей эффективностью ($\Delta\tau/\tau_{RH} = 0.050 \pm 0.029$, $n = 3$) независимо от их концентрации в среде окисления.

Ранее было установлено, что автоокисление RH при 323 К в диффузионной области описывается экспоненциальной зависимостью $[ROOH] = a \exp(kt)$ с коэффициентом корреляции 0.94–1.00 [8]. При этом на начальных стадиях процесса окисления, когда расходом субстрата можно пренебречь, изменение величин a и показателя экспоненты k в присутствии различных добавок относительно соответствующих значений для

субстрата окисления позволяет оценить их участие на разных стадиях процесса окисления [7, 8].

Анализ полученных в работе кинетических кривых окисления липидов с помощью компьютерного пакета программ KINS показал, что во всех вариантах экспериментов коэффициенты корреляции данной экспоненциальной зависимости варьируют в пределах 0.993–0.999. Величина предэкспоненциального множителя a достоверно уменьшается с ростом концентрации липидов, выделенных как из цветков календулы, так и из плодов облепихи, однако зависимости имеют сложный характер (рис. 6). Величина фактора a кинетических кривых накопления пероксидов обусловлена скоростью зарождения радикалов и продолжения цепи автоокисления метилолеата и

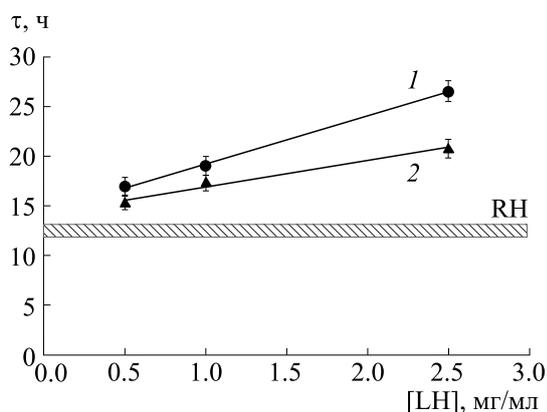


Рис. 5. Зависимость периода индукции автоокисления метилолеата в тонком слое при 323 К от концентрации липидов, выделенных из цветков календулы (1) и плодов облепихи (2); RH – метилолеат.

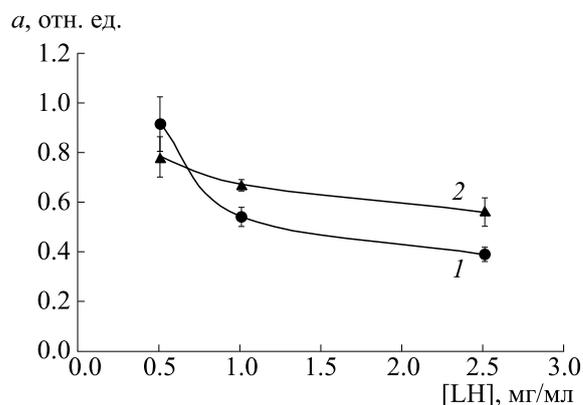


Рис. 6. Зависимость величины фактора a автоокисления метилолеата в тонком слое при 323 К от концентрации липидов, выделенных из цветков календулы (1) и плодов облепихи (2).

уменьшается с ростом антиоксидантных свойств липидов [23], поэтому его уменьшение в присутствии липидов из цветков календулы и плодов облепихи свидетельствует об их участии на стадиях зарождения радикалов и продолжения цепи. Поскольку в липидах, выделенных из ВПГ экстрактов, отсутствуют каротиноиды (рис. 4) и липиды практически не обладают антиоксидантными свойствами, это позволяет сделать вывод, что ингибирующая эффективность липидов из исходных растительных объектов обусловлена присутствием в них флавоноидов, что подтверждает и высокая антирадикальная активность липидов из цветков календулы. Как установлено в работе [7], кверцетин и дигидрокверцетин вызывают снижение величины фактора a в реакции автоокисления метилолеата в тонком слое на несколько порядков, в то время как эффект присутствующих в липидах цветков календулы и плодов облепихи флавоноидов существенно ниже (рис. 6). Это обусловлено способностью флавоноидов образовывать комплексы с ФЛ, что существенно уменьшает эффективность их ингибирующего действия [24, 25].

Независимо от концентрации, липиды из ВПГ экстрактов календулы практически не влияют на величину фактора a (1.090 ± 0.047), в то время как присутствие липидов из плодов облепихи приводит к его незначительному увеличению (1.29 ± 0.10), что соответствует различию в их антиоксидантных свойствах.

Так как величина показателя экспоненты k обусловлена общей скоростью процесса окисления [23], то необходимо отметить, что эффект липидов всех исследованных объектов на величину k не зависит от их концентрации. Липиды плодов облепихи практически не оказывают влияния на величину показателя ($k_{\text{отн}} = 0.94 \pm 0.03$, $n = 6$), липиды из цветков календулы вызывают его снижение ($k_{\text{отн}} = 0.63 \pm 0.04$, $n = 3$). При этом липиды из ВПГ-экстрактов проявляют обратный эффект: липиды экстрактов из цветков календулы не влияют на общую скорость окисления ($k_{\text{отн}} = 0.95 \pm 0.04$), а липиды экстрактов из плодов облепихи ее незначительно уменьшают ($k_{\text{отн}} = 0.84 \pm 0.02$). Влияние липидов на общую скорость окисления после выхода из периода индукции может быть обусловлено участием липидов и содержащихся в них БАВ в побочных реакциях, как, например, их способностью разлагать пероксиды, что характерно для компонентов многих растительных объектов [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предварительная экстракция растительного сырья полярным элюентом обу-

словливает существенные различия как состава и антиоксидантных свойств выделенных из них липидов, так и разнообразия БАВ в их хлороформных растворах по сравнению с аналогичными показателями липидов из исходных растений. Липиды и присутствующие в них БАВ из цветков календулы и плодов облепихи принимают участие в регуляции процесса автоокисления на стадиях зарождения радикалов и продолжения цепи окисления, обеспечивая их антиоксидантные свойства. Более высокая ингибирующая эффективность липидов из цветков календулы относительно липидов из плодов облепихи сопровождается и снижением общей скорости окисления после окончания периода индукции окисления в их присутствии. Существенное уменьшение доли ФЛ, основных субстратов окисления, в составе общих липидов из экстрактов и изменение набора БАВ по сравнению с липидами исходных объектов обуславливают их низкую ингибирующую эффективность. Это подтверждается как слабыми антиоксидантными свойствами липидов из ВПГ-экстрактов цветков календулы, так и незначительным ростом скорости зарождения радикалов и продолжения цепи окисления в присутствии липидов из экстрактов плодов облепихи.

Столь сложный и неоднозначный характер влияния липидного компонента растительного сырья на регуляцию окислительных процессов в зависимости от полярности элюентов, используемых в процессе его обработки, требует более детального анализа его состава и физико-химических свойств при оценке биологической активности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность н.с ИБХФ РАН к.х.н. В.А. Волкову, любезно предоставившему ВПГ-экстракты для исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (тема № 44.4, гос. № темы: 0084-2019-0014).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей или животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Gody, E. Middleton, and J. B. Harborne, *Plant flavonoids in biology and medicine: biochemical, pharmacological and structure-active relationships* (Liss, N. Y., 1986).
2. V. K. Gupta and S. K. Sharma, *Natural Product Radiance* **5** (4), 326 (2006).
3. N. Sirisha, M. Sreenivasulu, K. Sangeeta, and C. Madhusudhana Chetty, *Int. J. Pharm. Tech. Res.* **2** (4), 2174 (2010).
4. А. А. Семенов и В. Г. Карцев, *Биологическая активность природных соединений* (МБФНП «Научное Партнерство», М., 2012).
5. Ю. С. Тараховский, Ю. А. Ким, Б. С. Абдралилов и Е. Н. Музафаров, *Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина* (Synchrobook, Пушино, 2013).
6. Р. Геннис, *Биомембраны: Молекулярная структура и функции* (Мир, М., 1997).
7. L. I. Mazaletskaia, N. I. Sheludchenko, and L. N. Shishkina, In *Chemical Reactions in Gas, Liquid and Solid Phases Synthesis, Properties and Application*, Ed. by G. E. Zaikov and R. M. Kozilowsky (Nova Science Publisher, N. Y., 2012), pp. 11–20.
8. L. N. Shishkina, M. V. Kozlov, L. I. Mazaletskaia, et al., In *Antioxidants in Systems of Varying Complexity: Chemical, Biochemical, and Biological Aspects*, Ed. by L. N. Shishkina, A. N. Goloshchapov, and L. I. Weisfeld (Apple Acad. Press, Toronto, 2020), pp. 41–59.
9. *Фенольные соединения: свойства, активность, инновации: сборник инновационных статей по материалам X Международного симпозиума «Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты»*, под ред. Н. В. Загоскиной (М., 2018).
10. Yu. Nakamura, *Trends Plant Sci.* **22** (12), 1027 (2017).
11. A. M. Cassim, P. Gougue, J. Gronnie, et al., *Progr. Lipid Res.* **73**, 1 (2019).
12. X. Liu, D. Ma, Zh. Zhang, et al., *Environ. Exp. Botany* **165**, 174 (2019).
13. L. A. Colin and U. Jaillais, *Curr. Opin. Plant Biol.* **53**, 1 (2020).
14. В. О. Швыдкий, А. Н. Смирнова, В. А. Волков и Л. Н. Шишкина, *Химия раст. сырья*, № 1, 67 (2020).
15. М. Кейтс, *Техника липидологии* (Мир, М., 1975).
16. *Биологические мембраны. Методы*, под ред. Дж. Б. С. Финдлея и У. Г. Эванза (Мир, М., 1990).
17. W. M. Sperry and M. Webb, *J. Biol. Chem.* **187**, 97 (1950).
18. Л. Н. Шишкина, Е. В. Кушнирева и М. А. Смотряева, *Радиационная биология. Радиоэкология* **44** (3), 289 (2004).
19. В. Ф. Цепалов, А. А. Харитоновна, Г. П. Гладышев и Н. М. Эммануэль, *Кинетика и катализ* **18**, 1261 (1977).
20. Э. Ф. Брин и С. О. Травин, *Хим. физика* **10** (6), 830 (1991).
21. Г. Ф. Лакин, *Биометрия*, 3-е изд. (Высш. шк., М., 1990).
22. А. Г. Курегян, *Фундамент. исследования*, № 2 (23), 5166 (2015).
23. Л. Н. Шишкина и Н. В. Хрустова, *Биофизика* **51** (2), 340 (2006).
24. Л. И. Мазалецкая, Н. И. Шелудченко и Л. Н. Шишкина, *Прикл. биохимия и микробиология* **46** (2), 148 (2010).
25. L. Mazaletskaia, N. Sheludchenko, and L. Shishkina, *Chemistry & Chemical Technology*, **6** (1), 35 (2012).

Inhibitory Efficiency of the Lipid Component of Plant Objects in Dependence on the Eluent Polarity

L.N. Shishkina, L.I. Mazaletskaia, A.N. Smirnova, and V.O. Shvydkiy

Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, Moscow, 119334 Russia

Antioxidant properties, spectral characteristics and the composition of lipids isolated from pot marigold flowers and sea buckthorn berries and their 50%-water-propyleneglycol extracts were studied. Significant quantitative differences in the inhibitory efficiency, the quantitative relations of fractions of lipids and the presence of bioactive substances in the chloroform solution were identified according to eluent polarities, thereby enabling the involvement of the lipid component of plant objects in the regulation of oxidation at different stages of this process. These data were confirmed by analysis of the kinetic curves of the peroxide accumulation performed by means of the KINS computer programs and mathematical treatment of UV-spectra of the lipid solutions using the Gaussian Elimination method.

Keywords: inhibitory efficiency, lipids, extracts, low temperature oxidation, UV-spectrophotometry, computer modeling