

Разработка методики одновременного определения жирных и фенольных кислот – ценных вторичных метаболитов плодов рябины (*Sorbus* L.)

© 2026. Н. Э. Вебер, аспирант, И. В. Груздев, д. х. н., в. н. с.,
О. Г. Шевченко, к. б. н., с. н. с., О. В. Скроцкая, к. б. н., зав. отделом,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: veber.n@ib.komisc.ru

Плоды рябины (*Sorbus* L.) хорошо известны своими питательными и лечебными свойствами, часть из которых напрямую связана с высоким содержанием органических кислот. Антиоксидантная активность плодов рябины ассоциирована с фенолкарбоновыми кислотами, в то время как биологическая ценность её липидного комплекса определяется наличием в составе липидов незаменимых жирных кислот из рядов ω -3 и ω -6. Для отдельного определения высших карбоновых кислот и фенолкислот при их совместном присутствии в растительных материалах разработана экстракционно-хроматографическая методика, при реализации аналитического цикла которой происходит полное отделение соединений этих двух классов органических кислот. Идентификацию и количественное определение кислот проводят газохроматографическими методами с масс-селективным или пламенно-ионизационным детектором (ГХ-МС/ПИД). Апробация методики проведена на плодах разных видов и сортов рода *Sorbus*, широко представленных в научной коллекции Ботанического сада ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. В экстрактах из плодов рябины методом ГХ-МС было идентифицировано 18 жирных и 7 фенольных кислот. Проведена сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов плодов рябины различных видов и сортов. Выявлены образцы (*S. aucuparia* subsp. *phuashanensis*), сочетающие высокое содержание феруловой и кофейной кислот с выраженной антиоксидантной активностью. Разработанная методика определения органических кислот в растительных материалах может быть рекомендована для сопровождения селекционного процесса и направленного отбора растений для производства фитопрепаратов и биологически активных добавок.

Ключевые слова: жирные кислоты, фенольные кислоты, рябина (*Sorbus* L.), газовая хроматография, антиоксидантная активность.

Development of a method for the simultaneous determination of fatty and phenolic acids – valuable secondary metabolites of rowan berries (*Sorbus* L.)

© 2026. N. E. Veber ORCID: 0000-0003-4165-365X, I. V. Gruzdev ORCID: 0000-0002-6693-3925,
O. G. Shevchenko ORCID: 0000-0001-5331-3201, O. V. Skrotskaya ORCID: 0000-0001-8090-1308*
Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: veber.n@ib.komisc.ru

Rowanberry fruits (*Sorbus* L.) are well known for their nutritional and medicinal properties, some of which are directly related to their high content of organic acids. The antioxidant activity of rowan fruits is associated with phenolic carboxylic acids, while the biological value of their lipid complex is determined by the presence of essential ω -3 and ω -6 fatty acids. An extraction-chromatographic method was developed to separate the higher carboxylic and phenolic acids in plant raw material. This method allows complete separation of these two classes of organic acids during the analytical cycle. The acids identification and quantification are performed using gas chromatography with a mass-selective or flame-ionization detector (GC-MS/FID). The method was tested on the fruits of *Sorbus* various species and cultivars, which are widely represented in the scientific collection of the Botanical Garden of the Institute of Biology at the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Using GC-MS, 18 fatty acids and 7 phenolic acids were identified in the extracts of rowan fruits. A comparative assessment of the antioxidant activity of extracts from rowan fruits of different species and cultivars was carried out. We identify samples (*S. aucuparia* subsp. *phuashanensis*)

that combine high content of ferulic and caffeic acids with pronounced antioxidant activity. The developed method for determining organic acids in plant raw material can be recommended for supporting the breeding process and targeted selection of plants for phytopharmaceuticals and dietary supplements production.

Keywords: fatty acids, phenolic acids, *Sorbus* L., gas chromatography, antioxidant activity.

Виды рода *Sorbus* L. – рябина (семейство Rosaceae Juss.) произрастают в разнообразных почвенно-климатических условиях в умеренном поясе Северного полушария, встречаются в условиях высокогорных тропиков и субтропиков, в арктическом поясе. В пределах территории бывшего СССР – около 30 видов [1–4], в Республике Коми отмечены два вида рябины – *Sorbus aucuparia* и *S. aucuparia* subsp. *glabrata* [5].

В Ботаническом саду ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН родовой комплекс видов *Sorbus* формируется с 1946 г. В настоящее время в Ботаническом саду изучаются и сохраняются более 30 таксонов рябины. Растения выращены из семян, полученных по делектусам из ботанических учреждений России и зарубежья, привлечены саженцами из плодово-ягодных питомников и природных местообитаний. Изучаемые виды рябины – представители европейско-средиземноморской, евроазиатской и восточноазиатской флор.

Различные виды рябины (включая отборные образцы и формы) могут служить донорами таких признаков, как низкорослость, отсутствие горечи в плодах, крупноплодность, некоторые обладают достаточной зимостойкостью, что определяет возможность их культивирования в условиях Севера.

Ценные питательные и лечебные свойства плодов рябины обуславливают их востребованность в фармацевтической и пищевой индустрии, а также в методах нетрадиционной медицины. Различные виды и сорта рябины характеризуются многокомпонентным химическим составом [6], в плодах идентифицированы углеводы (до 7,5 %), комплекс органических кислот – янтарная, лимонная, яблочная, винная и др. (2–3 %), а также фенолкарбоновые кислоты, аминокислоты, катехины, флавоноиды и тритерпены (до 2 %), танины, пектины и каротиноиды (до 1 %), витамины (С, В₂, Е, Р) и широкий спектр неорганических компонентов [7, 8].

Высокое содержание фенольных соединений в плодах рябины делает их ценным источником биологически активных соединений, потребление которых в ежедневном рационе снижает риск заболеваний, связанных со старением [9]. Среди химических свойств

фенольных кислот особый интерес вызывает антиоксидантная активность, зависящая, прежде всего, от количества и положения фенольных гидроксильных групп, присутствия в молекулах донорных метоксильных групп ($-\text{OCH}_3$), а также от структуры карбоксильной группы ($-\text{COOH}$, $-\text{CH}=\text{CHCOOH}$, $-\text{CH}_2\text{COOH}$) [10, 11].

Другие важнейшие органические соединения плодов рябины – высшие (жирные) алифатические карбоновые кислоты. Для поддержания здоровья человеку критически важны несинтезируемые полиненасыщенные жирные кислоты линолевого и линоленового рядов (*омега*-6 и *омега*-3), поступающие только с пищей [12–14]. В связи с этим, растения выступают важнейшим источником омега-кислот, содержание которых сильно варьирует и определяется таксономической принадлежностью и климатическими условиями произрастания растений [15, 16].

Уникальные свойства и высокая ценность органических кислот в комплексе с другими биологически активными веществами могут быть использованы для осуществления химического контроля селекционного процесса и целенаправленного отбора интродуцируемых в Ботаническом саду растений. В связи с этим актуальна разработка методик, позволяющих в рамках одного аналитического цикла определять жирные и фенольные кислоты в растительных материалах для реализации таких исследований.

Анализ индивидуальных органических кислот в растительных материалах обычно включает несколько последовательных стадий: экстракцию, химическую модификацию, идентификацию и количественный анализ хроматографическими методами [17, 18].

Извлечение кислот из растений, как правило, проводят путём экстракции органическими экстрагентами, для чего применяют распространённые растворители (гексан, диэтиловый эфир, метанол, этанол, хлороформ и др.) – как в чистом виде, так и смеси при разных соотношениях полярных и неполярных экстрагентов [19–22].

В экстрактах из растительных материалов органические кислоты анализируют методом высокоэффективной жидкостной хроматогра-

фии (ВЭЖХ) с хемилюминесцентным [23], масс-селективным [24–27] или с фотодиодным матричным детектором [25–27].

В качестве альтернативы ВЭЖХ при определении органических кислот в растениях выступают газохроматографические методы (ГХ). Важная особенность ГХ методов – стадия этерификации кислот, необходимая для увеличения летучести анализируемых соединений [28, 29]. Высокая реакционная способность гидроксильных и карбоксильных групп органических кислот предоставляет широкие возможности для проведения дериватизации и позволяет решать самые сложные аналитические задачи [28–30]. Наиболее устойчивые дериваты органических кислот получают по реакциям алкилирования [31–33] и силилирования [34–36], которые, после разделения на силиконовых неподвижных жидких фазах, определяют при помощи пламенно-ионизационного [32–34] или масс-спектрометрического детектора [31, 35, 36].

При сравнении ВЭЖХ и ГХ методов преимуществом, на наш взгляд, обладают ГХ методы, располагающие высокоэффективными капиллярными колонками и большими возможностями при масс-спектрометрическом детектировании кислот из-за наличия обширных баз данных масс-спектров (NIST, Wiley, MPW и др.) [24, 37, 38]. Кроме того, методы химической модификации, которые активно развиваются именно в газовой хроматографии, позволяют существенно расширить круг анализируемых соединений [29, 30, 39].

При изучении компонентного состава экстрактов, полученных из растений, часто возникает необходимость удаления сопутствующих компонентов или полного выделения аналитов ещё до проведения инструментального анализа. Так, содержание фенольных кислот в некоторых лекарственных растениях может на порядок и более отличаться от содержания жирных кислот, что делает невозможным их одновременное определение даже хроматографическими методами [24, 40].

Цель работы – разработка высокоселективного способа одновременного определения фенольных и жирных кислот в растительных материалах (плоды представителей рода *Sorbus* L.) методом газовой хроматографии, а также сравнительная оценка содержания органических кислот и антиоксидантной активности экстрактов, полученных из плодов разных видов и сортов рябины.

Объекты и методы исследования

Методика определения жирных и фенольных кислот в плодах рябины. Измельчённые воздушно-сухие образцы рябины массой 0,25–0,50 г переносили в коническую колбу (100 см³), вводили 10 см³ метанола и проводили экстрагирование на перемешивающем устройстве (ELMI S-3L.A20, Латвия) при частоте 150 об./мин в течение 30 мин. Часть полученного спиртового экстракта объёмом 5 см³ отбирали в стеклянную винтовую вialу вместимостью 15 см³ и добавляли 350 мм³ соляной кислоты (38 %). Для проведения кислотного метанолиза органических кислот вialу герметично закрывали и в течение 90 мин термостатировали при 90 °C. Далее смесь охлаждали, добавляли 0,5 см³ раствора гексадекана в толуоле (0,1 мг/см³), 1,5 см³ раствора NaOH (3 моль/дм³), 2,5 см³ насыщенного раствора NaCl и экстрагировали в течение 5 мин. Полученный толуольный экстракт анализировали методом ГХ с использованием пламенно-ионизационного детектора (ПИД) на содержание жирных кислот.

Идентификацию метиловых эфиров жирных кислот в экстракте проводили методом хромато-масс-спектрометрии: газовый хроматограф «Thermo GC Ultra» (Thermo, США) с масс-селективным детектором «DSQ» (Thermo) в режиме электронного удара (70 эВ, диапазон сканирования масс 45–650 Да). Для анализа масс-спектров применяли программное обеспечение Xcalibur 1.4 (Thermo), AMDIS 2.73 (NIST) и библиотеку масс-спектров NIST 05 (350 тыс. соединений).

Количественный анализ жирных кислот проводили на газовом хроматографе «TRACE 1310» (Thermo) с ПИД методом внутреннего стандарта (внутренний стандарт – гексадекан) при следующих условиях: кварцевая капиллярная колонка HP-FFAP (Agilent, США) 30 м × 0,32 мм × 0,25 мкм; газ-носитель – гелий (99,995 %), скорость потока через колонку – 0,8 см³/мин; программирование температуры термостата колонок 110 °C – 5 °C/мин – 245 °C, скорость потока воздуха (ПИД) – 200 см³/мин, скорость потока водорода (ПИД) – 20 см³/мин, деление потока – 1:25. Температура испарителя 280 °C, детектора 250 °C.

Оставшийся после выделения жирных кислот водно-спиртовой раствор анализировали на содержание фенольных кислот по методике, приведённой в работе [41].

Методика определения антиоксидантной активности. Сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов плодов рябины проведена на традиционных моделях *in vitro* [42–47]. Для анализа антирадикальной активности (АРА) применены тесты с катион-радикалом диаммониевой соли 2,2'-азинобис(3-этилбензтиазолин-6-сульфоукислоты) (ABTS) [48–50] и 2,2-дифенил-1-пикрилгидразином (DPPH) [48, 51]. Ингибирующая способность экстрактов Fe^{2+} /аскорбат-инициированного перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценена в модельном субстрате (эмульсии «масло в воде»), полученном на основе гомогенатов головного мозга мышей [52–54].

Для инкубации субстрата применяли орбитальный шейкер-инкубатор ES-20 (BioSan, Латвия). Поглощение измеряли с помощью спектрофотометра «Genesys 20» (Thermo Spectronic, США). В качестве стандартов использовали растворы галловой и 4-гидроксикоричной (*пара*-кумаровой) кислот в метаноле в концентрации, соответствующей уровню содержания фенольных кислот в исследуемых экстрактах (20 мг/см³).

Для статистической обработки данных применяли программы Statistica 6.0 и Microsoft Office Excel (2007). Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартная ошибка выборки (4–8 повторностей). Статистическая значимость различий рассчитана по критерию Манна–Уитни (Mann–Whitney, U-test), *p* – уровень значимости различий. Взаимосвязь между отдельными параметрами оценена по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена (*r*).

Результаты и обсуждение

Методика количественного химического анализа органических кислот в растительных материалах. Предложен способ определения высших карбоновых и фенольных кислот в растительных материалах при их совместном присутствии, при реализации которого происходит полное отделение соединений этих двух классов органических кислот (рис. 1).

Основной вклад в повышение селективности определения аналитов достигается за счёт применения двухстадийной химической модификации (рис. 2). В условиях кислотного метанолиза этерификации подвергаются только карбоксильные группы, входящие в состав фенольных и жирных кислот [33]. Гидроксильные группы фенолукислот дериватизацией не затрагиваются, что позволяет переводить их молекулы в ионную форму и количественно сохранять в водно-спиртовом щелочном растворе на стадии экстракции толуолом.

В то же время, степень извлечения метиловых эфиров жирных кислот (C_{12} – C_{26}) при используемом фазовом отношении ($r = 20$), по нашей оценке, составляет не менее 97–98 %. Выделенные в экстракт эфиры жирных кислот далее анализируют методом ГХ-ПИД (рис. 3).

Получаемые эфиры будут характеризовать, в том числе, и жирнокислотный профиль липидов растений, поскольку параллельно с реакцией этерификации протекает переэтерификация липидов в соответствующие эфиры жирных кислот [33].

Оставшиеся в водно-спиртовом растворе фенольные кислоты сначала экстрагируют

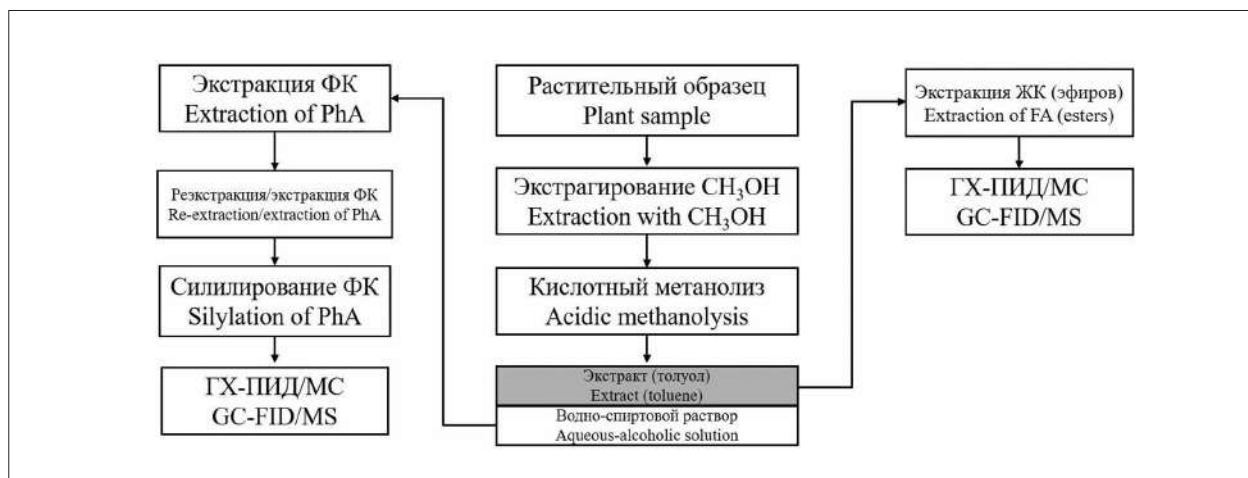


Рис. 1. Аналитический цикл при одновременном определении жирных (ЖК) и фенольных кислот (ФК) в растительных материалах

Fig. 1. Analytical cycle for simultaneous detection of fatty (FA) and phenolic (PhA) acids in plant raw materials

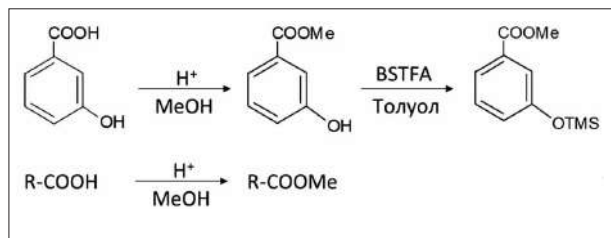


Рис. 2. Двухстадийная химическая модификация при определении жирных и фенольных кислот; Me – метильная группа, TMS – триметилсилильная группа

Fig. 2. Two-step chemical modification for fatty and phenolic acids detection;

Me – methyl group, TMS – trimethylsilyl group

большим объёмом толуола и из полученного экстракта реэкстрагируют кислоты в щелочной раствор малого объёма (рис. 1). В результате этих операций происходит не только значительное концентрирование фенолкислот, но и устраняется мешающее влияние сопутствующих компонентов не кислотной природы [55]. Выделенные в экстракт фенолкислоты после силилирования по гидроксильной группе определяют методом ГХ-ПИД (рис. 2, 3). Следует отметить, что проведение химической модификации фенолкислот по гидроксильной группе перед газохроматографическим определением является обязательной процедурой, поскольку в исходной форме такие соединения характеризуются низкой летучестью и высокой термолабильностью [28].

Важнейший этап количественного химического анализа любых твёрдых матриц – стадия экстрагирования аналитов с целью максимально полного извлечения их из образца. Степень экстрагирования определяется целым рядом факторов, к важнейшим из которых относятся свойства растворителя и экстрагируемых соединений, длительность экстракции, массовое соотношение экстрагента и образца при экстракции [56, 57].

Применение низших алифатических спиртов (метанол и его ближайшие гомологи) и их смесей с водой обеспечивает высокую эффективность извлечения полярных органических веществ из твёрдых матриц, что связывают с наличием как неполярной части, представленной углеводородным радикалом, так и полярного центра (гидроксильная группа) [58]. При использовании в качестве экстрагентов кетонов, простых эфиров, ароматических углеводородов, алканов и их галогенпроизводных – именно метанол демонстрирует макси-

мальную степень извлечения органических кислот (рис. 4).

Следует отметить, что эффективность извлечения кислот возрастает в ряду: гексан → бензол → диметилкетон → диэтиловый эфир → хлористый метилен → метанол, что согласуется с увеличением в этом же ряду индекса полярности этих растворителей [59].

Нами показано, что оптимизированные ранее условия извлечения фенолкислот из растений метанолом [41] могут быть применены и для экстрагирования алифатических карбоновых кислот. Степень извлечения жирных кислот из растительных материалов также достигает максимальных значений при продолжительности экстрагирования не менее 30 мин и массовом соотношении экстрагент/образец в интервале от 10 до 15 (рис. 5).

Определение органических кислот в растительных образцах. На основе предложенного подхода и проведённых исследований по оптимизации стадий экстракции и дериватизации разработана методика одновременного определения жирных кислот и фенолкарбоновых кислот в растительных материалах (рис. 1). Методика была опробована при определении содержания фенольных и жирных кислот в плодах разных интродуцированных видов и сортов рода *Sorbus*, представленных в научной коллекции Ботанического сада ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (табл. 1).

В исследованных плодах десяти интродуцентов рода *Sorbus* методом хромато-масс-спектрометрии было идентифицировано 18 жирных кислот и 7 фенольных кислот (табл. 2, 3).

Среди жирных кислот доминируют их ненасыщенные представители – линолевая, олеиновая и линоленовая кислоты (табл. 2), входящие в группу незаменимых ω -кислот.

Среднее содержание ω -кислот в исследованных образцах составляет 2–3 мг/г, исключая сорта «Алая крупная», «Титан» и «Гранат», где их в 3–5 раз меньше. Содержание фенолкислот в плодах исследуемых интродуцентов в 2–8 раз ниже по сравнению с высшими карбоновыми кислотами (табл. 3). В плодах рябины преобладают кофейная и оксикоричная кислоты, в меньших количествах представлены феруловая и гидроксибензойные кислоты.

Наиболее богаты фенольными кислотами плоды рябины сорта «Гранат» и *S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis*. В плодах сортов «Алая крупная» и «Титан» содержание фенолкислот в 2–3 раза ниже (табл. 3).

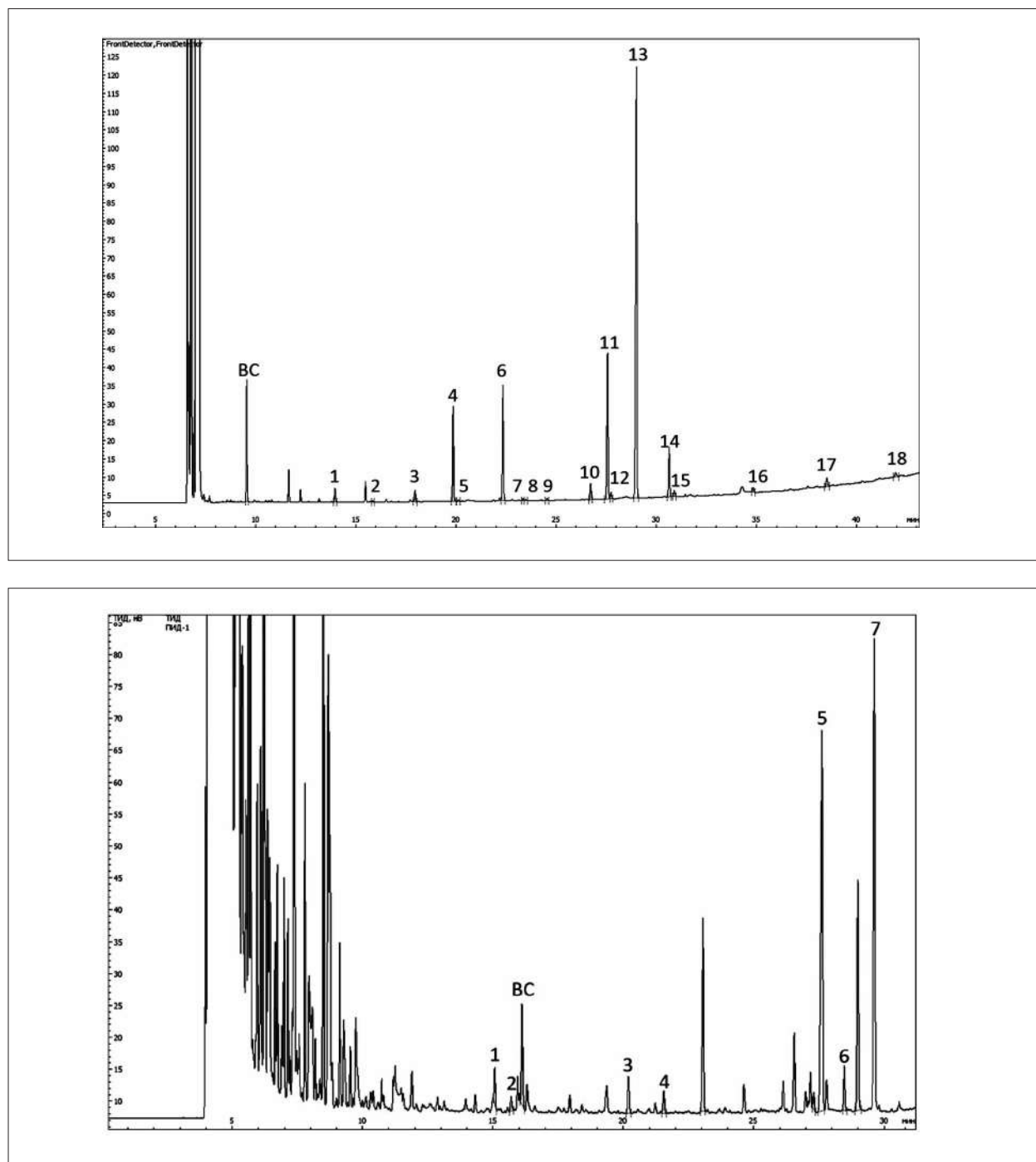


Рис. 3. Хроматограмма экстракта жирных кислот плодов рябины *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* (вверху) и экстракта фенольных кислот плодов рябины сорта «Гранат» (внизу); нумерация пиков на хроматограммах приведена в соответствии с таблицами 2 и 3

Fig. 3. Chromatogram of the fatty acid extract of *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* berries (top) and the phenolic acid extract of *Sorbus* 'Granat' variety berries (below); the peak numbers in the chromatograms are given in accordance with Tables 2 and 3

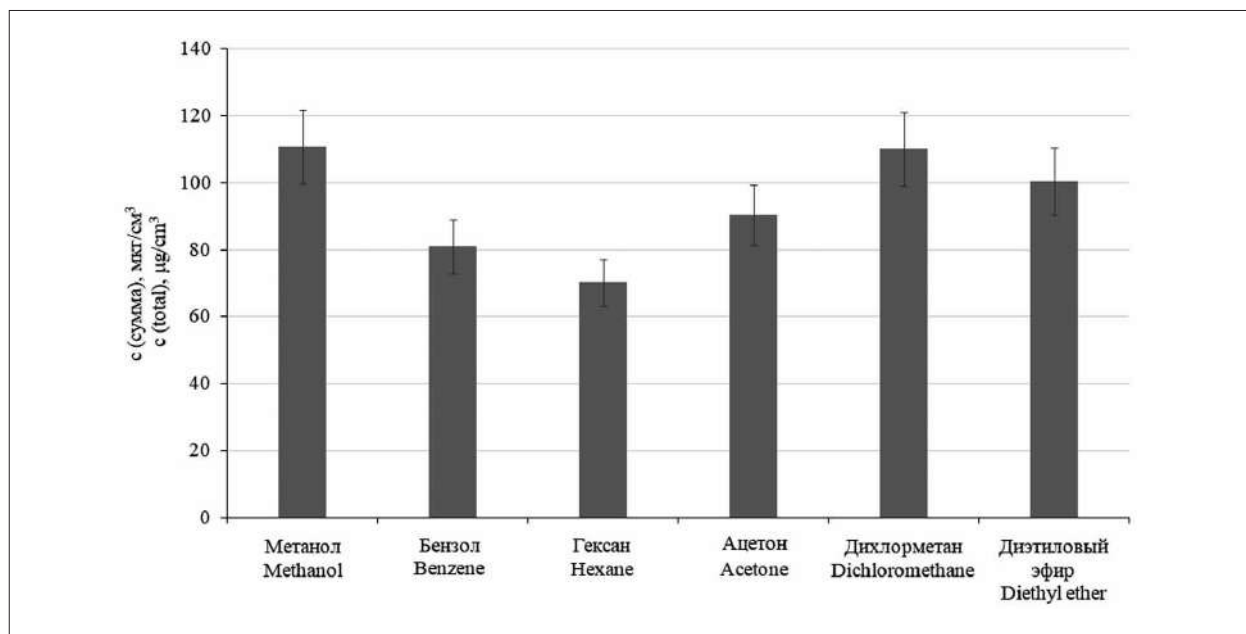


Рис. 4. Зависимость концентрации жирных кислот в экстракте из плодов *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* от применяемого экстрагента
 Fig. 4. Dependence of the fatty acids concentration in the *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* berries' extract on the extractant used

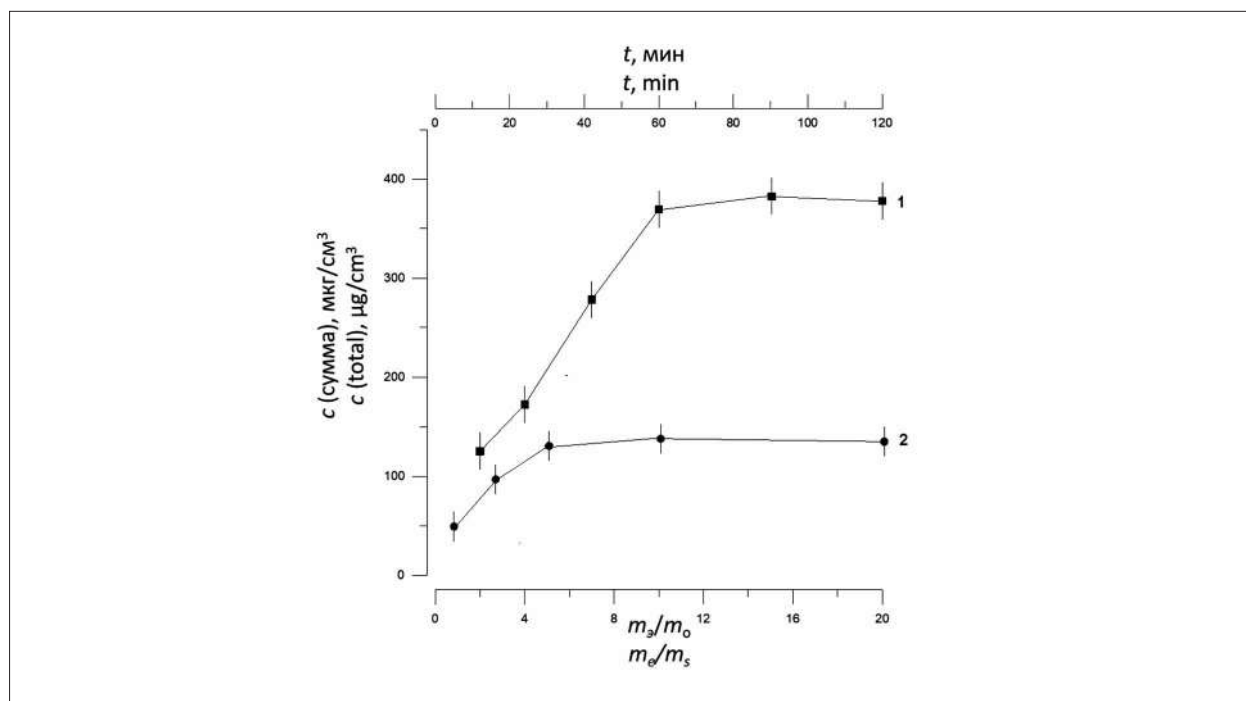


Рис. 5. Зависимость концентрации жирных кислот в экстракте из плодов *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* при экстрагировании метанолом от массового соотношения экстрагент/образец (1) и времени механического перемешивания (2)
 Fig. 5. Dependence of the concentration of fatty acids in the *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* berries' extract during extraction with methanol on the mass ratio of extractant/sample (1) and the time of mechanical stirring (2)

Таблица 1 / Table 1

Интродуцируемые представители рода *Sorbus* / Introduced representatives of the *Sorbus* genus

№	Название таксона* The name of the taxon*	Происхождение образца The origin of the sample
1	<i>Sorbus americana</i>	Дрезден / Dresden
2	Сорт «Алая крупная» / «Alaya Krupnaya» variety	Мичуринск / Michurinsk
3	Сорт «Титан» / «Titan» variety	Мичуринск / Michurinsk
4	<i>Sorbus aucuparia</i> subsp. <i>glabrata</i>	Петрозаводск / Petrozavodsk
5	<i>Sorbus commixta</i>	Петрозаводск / Petrozavodsk
6	<i>Sorbus aucuparia</i> subsp. <i>pohuashanensis</i>	Латвия / Latvia
7	<i>Sorbus aucuparia</i> subsp. <i>pohuashanensis</i>	Таллин / Tallinn
8	<i>S. aucuparia</i>	Дендропарк «ЛОСС» / Arboretum «LOSS»
9	Сорт «Гранат» / «Granat» variety	Саратов / Saratov
10	Сорт «Рубиновая» / «Rubinovaya» variety	Мичуринск / Michurinsk

Примечание: * – по номенклатуре World Flora Online (<http://www.worldfloraonline.org>).Note: * – according to the World Flora Online nomenclature (<http://www.worldfloraonline.org>).

Таблица 2 / Table 2

Результаты количественного химического анализа жирных кислот (плоды рябины)

Results of fatty acids' quantitative chemical analysis (*Sorbus* berries)

№	Соединение Compound	Содержание соединения в образце, мкг/г / Compound content in the sample, µg/g									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C12:0	44,5*	27,3	39,2	55,7	104,4	123,4	54,1	94,2	36,3	70,3
2	C13:0	1,8	3,0	0,7	5,9	6,9	4,7	9,4	7,1	1,2	3,7
3	C14:0	61,4	24,3	22,9	49,7	104,8	131,3	64,7	89,5	30,4	54,9
4	C7:2	1479,1	1383,0	900,5	416,5	421,7	675,8	1339,8	493,2	1150,7	638,8
5	C15:0	6,0	3,5	3,5	6,5	8,6	9,7	5,2	8,7	2,7	5,2
6	C16:0	464,3	216,6	214,7	558,6	804,9	866,8	464,2	765,8	201,0	417,4
7	C16:1 (9c)	10,2	3,5	4,5	10,2	20,0	22,3	17,8	23,5	3,4	9,2
8	i-C17:0	4,6	7,4	7,5	5,9	2,9	7,3	4,5	3,5	10,5	7,7
9	C17:0	10,0	4,7	13,9	8,7	15,7	13,9	9,3	16,4	2,8	8,2
10	C18:0	94,0	44,8	25,8	83,3	140,4	156,9	90,2	149,4	31,0	75,6
11	C18:1 (9c)	391,4	88,2	125,3	764,5	1415,3	1044,9	593,3	1208,8	151,7	580,9
12	C18:1 (11c)	24,3	13,9	15,3	28,3	48,2	36,6	24,8	37,5	12,4	17,7
13	C18:2 (9c,12c)	1132,5	351,5	363,8	2372,3	3926,2	2779,3	1595,0	3076,7	521,2	1499,1
14	C18:3 (6c,9c,12c)	252,8	90,7	76,2	247,1	322,6	280,9	184,9	293,9	70,7	117,4
15	C20:0	33,6	19,5	12,0	33,0	50,1	65,3	34,2	57,4	14,0	26,3
16	C22:0	32,4	16,7	9,4	28,4	37,4	46,9	25,0	34,9	9,8	20,3
17	C24:0	45,5	21,4	15,3	54,2	35,7	47,4	44,3	38,4	7,1	19,9
18	C26:0	28,0	18,5	29,6	29,4	21,2	26,7	29,3	27,5	11,9	16,7

Примечание к таблицам 2, 3: * – виды и сорта рябины (1–10) указаны в соответствии с таблицей 1.

Note to tables 2, 3: * – *Sorbus* types and varieties (1–10) are indicated in accordance with Table 1.

Антиоксидантная активность экстрактов плодов представителей рода *Sorbus*. Показано, что антирадикальная активность (АРА) экстрактов плодов рябины в тестах с DPPH и ABTS существенно зависит от вида и сорта (рис. 6).

Наибольшей активностью отличались образцы 7 и 8 (*S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis* (Таллин), *S. aucuparia* (ЛОСС)). Низкая активность отмечена для образца 2 (сорт «Алая

крупная»). Результаты, полученные в этих тестах, статистически значимо коррелировали между собой ($r = 0,927$, $p = 0,001$). Отметим, что в тесте со стабильным радикалом DPPH все исследуемые образцы экстрактов превосходили растворы чистых фенольных кислот, выбранных в качестве стандарта (галловой и 4-гидроксикоричной), что свидетельствует о присутствии в экстрактах более активных компонентов.

Таблица 3 / Table 3

Результаты количественного химического анализа фенольных кислот (плоды рябины)
Results of phenolic acids' quantitative chemical analysis (*Sorbus* berries)

№	Соединение Compound	Содержание соединения в образце, мкг/г Compound content in the sample, µg/g									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<i>p</i> -Гидроксibenзойная кислота <i>p</i> -Hydroxybenzoic acid	32,3*	24,9	10,7	18,2	36,3	39,8	28,5	40,5	30,2	54,3
2	<i>o</i> -Гидроксibenзойная кислота <i>o</i> -Hydroxybenzoic acid	10,7	23,7	7,7	10,1	9,9	22,2	26,7	12,7	18,4	21,7
3	Ванилиновая кислота Vanillic acid	17,7	16,3	15,7	4,7	6,4	6,1	11,4	1,6	37,7	8,7
4	3,4-дигидроксibenзойная кислота 3,4-dihydroxybenzoic acid	3,0	4,6	7,0	4,0	4,7	17,1	7,6	9,5	22,2	16,1
5	Оксикоричная кислота Oxycoric acid	520,8	243,2	165,8	226,6	352,7	380,5	335,2	321,2	405,6	354,1
6	Феруловая кислота Ferulic acid	76,2	38,2	28,1	49,7	69,3	78,0	90,4	64,0	46,8	40,4
7	Кофейная кислота Caffeic acid	213,3	28,1	77,7	38,7	40,0	304,6	564,4	121,1	476,9	196,7

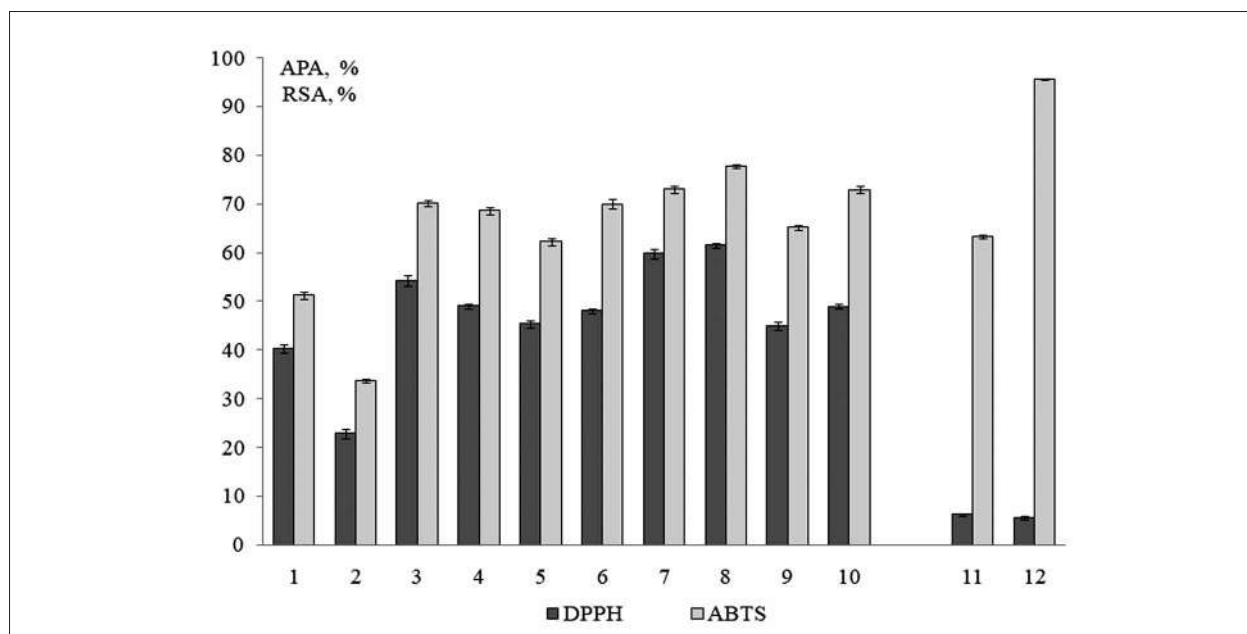


Рис. 6. Антирадикальная активность (АРА) экстрактов рябины в концентрации 0,05 мг/см³ в тестах с DPPH и ABTS (здесь и на рисунке 7: 1–10 в соответствии с таблицей 1, 11 – галловая кислота, 12 – гидроксикоричная кислота)

Fig. 6. Radical scavenging activity (RSA) of *Sorbus* extracts at 0.05 mg/cm³ concentration in tests with DPPH and ABTS (here and in Figure 7: 1–10 according to Table 1, 11 – gallic acid, 12 – hydroxycinnamic acid)

Высокая АРА экстрактов плодов рябины подтверждается и в тестах на модели Fe^{2+} /аскорбат-инициированного ПОЛ в эмульсии, содержащей легкоокисляемые липиды головного мозга лабораторных животных (рис. 7). Оценивали способность образцов ингибировать накопление ТБК-АП в субстрате через 1 ч после Fe^{2+} /аскорбат-инициированного ПОЛ. Все исследуемые экстракты статистически значимо ингибировали накопление в субстрате вторичных продуктов ПОЛ (ТБК-АП) по сравнению с контролем ($p = 0,021$). Наибольшей активностью в обеих концентрациях (0,05 и 0,2 мг/см³) обладали образцы 7 (*S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis* (Таллин) и 10 (сорт «Рубиновая»). Мощную ингибирующую активность образца 7 можно связать с присутствием в нём значительных количеств феруловой и кофейной кислот (табл. 3), известных высокой антиоксидантной активностью [49, 60].

Высокая антиоксидантная активность образца 10, вероятно, связана с присутствием в экстракте иных, не идентифицированных в настоящем исследовании соединений, к числу которых могут относиться каротиноиды, антоцианы и пр.

Известно, что фенольные кислоты существенно различаются между собой как по антирадикальной активности, так и по способности ингибировать инициированное окисление модельного субстрата, в том числе в дисперсных системах. Так, в настоящем исследовании галловая кислота, в отличие от 4-гидроксико-

ричной (*пара*-кумаровой), проявила слабую антиоксидантную активность на модели Fe^{2+} /аскорбат-инициированного ПОЛ (рис. 7).

Низкая эффективность галловой кислоты в дисперсных системах (эмульсиях «масло в воде»), обусловленная её высокой полярностью и преимущественной локализацией в водной фазе, подтверждается данными литературы [10, 61, 62].

Очевидно, что антиоксидантная активность многокомпонентных растительных экстрактов, особенно в сложных тест-системах, не может быть обусловлена присутствием одних лишь фенольных кислот вследствие наличия других, неидентифицированных соединений (пигментов, многоядерных фенолов и др.), также способных участвовать в регуляции свободно-радикальных процессов, выступать в роли синергистов и прооксидантов.

Тем не менее, результаты анализа, полученные методом газовой хроматографии, позволяют выделить наиболее ценные в отношении содержания в плодах фенольных и жирных кислот сорта и виды рябины, к которым относятся *S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis*, отличающиеся и высокой антиоксидантной активностью.

Заключение

Для отдельного определения высших карбоновых кислот (C_{12} – C_{24}) и фенолкислот (2- и 4-гидроксibenзойная, 3,4-дигидрокси-

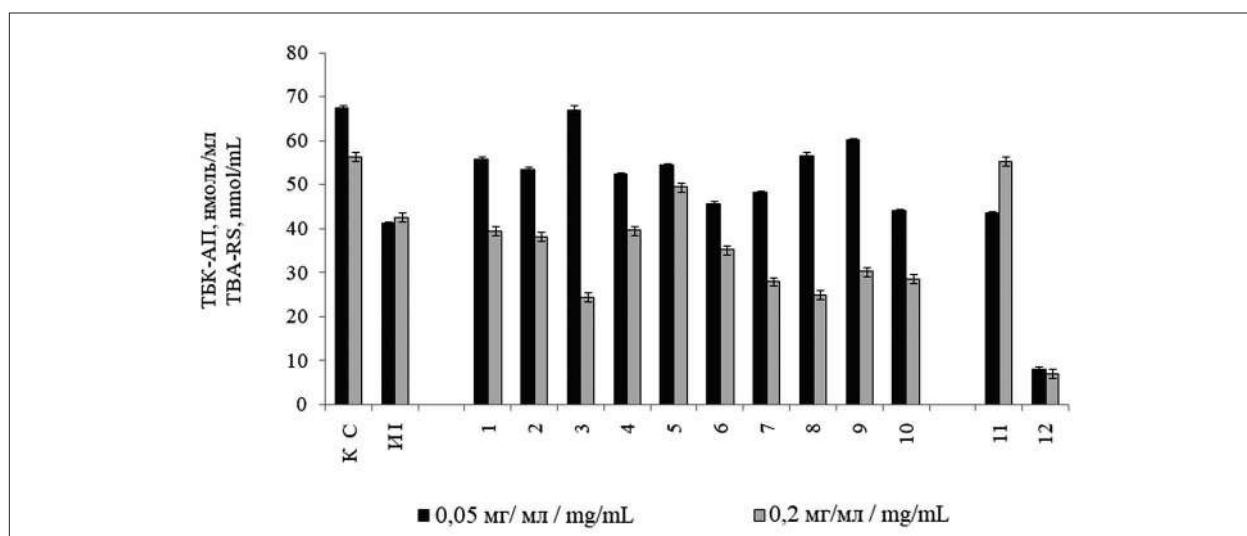


Рис. 7. Антиоксидантная активность экстрактов рябины в концентрации 0,05 и 0,2 мг/мл в субстрате на основе липидов головного мозга животных. Контроль (К) – образцы без тестируемых экстрактов, интактные (И) – образцы, в которых инициирование окисления не проводили

Fig. 7. Antioxidant activity of *Sorbus* extracts at concentrations of 0.05 and 0.2 mg/mL in a substrate based on animal brain lipids. Control (C) – samples without the tested extracts, intact (I) – samples without initiated oxidation

бензойная, ванилиновая, оксикоричная, феруловая и кофейная кислота) при их совместном присутствии в растительных материалах разработана экстракционно-хроматографическая методика, при реализации аналитического цикла которой происходит полное отделение соединений этих двух классов органических кислот. Идентификацию и количественное определение кислот проводят газохроматографическими методами с масс-селективным или пламенно-ионизационным детектором. Проведена оптимизация условий экстракционного извлечения кислот из растительных материалов, дериватизации и газохроматографического определения полученных производных. Диапазон определяемых содержаний органических кислот составляет 0,0005–0,5 мг/г, относительная погрешность – 10–15 %, масса навески – 0,5 г, общая продолжительность анализа – 4 ч.

Апробация методики проведена на плодах разных видов и сортов рода *Sorbus*, широко представленных в научной коллекции Ботанического сада ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. В экстрактах из плодов рябины методом газовой хроматографии с масс-селективным детектором были идентифицировано 18 жирных и 7 фенольных кислот. Выявлены образцы (*S. aucuparia* subsp. *pohuashane*), сочетающие высокое содержание феруловой и кофейной кислот с выраженной антиоксидантной активностью. Разработанная методика на основании анализа широкого круга важнейших органических кислот позволяет делать обоснованные выводы о перспективности селекции или интродукции дикорастущих и культивируемых растений.

Настоящая статья не содержит описания исследований с использованием в качестве объектов животных и людей. Экспериментальная работа с использованием тканей интактных мышей (in vitro) одобрена комиссией по биоэтике Института биологии Коми НЦ УрО РАН, протокол № 5 от 16.04.2024 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Оценка влияния климатических условий Севера на процессы репродукции ресурсных растений» (№ 125021302139-3). Образцы плодов рябины получены из УНУ «Научная коллекция живых растений Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН» (№ 507428). Определение химического состава образцов проведено на оборудовании ЦКП «Хроматография» (№ 3297). Исследование антиоксидантной активности экстрактов плодов рябины выполнено на базе

ЦКП «Молекулярная биология», в работе использованы мыши из научной коллекции экспериментальных животных Института биологии Коми НЦ УрО РАН (<https://ckp-rf.ru/usu/471933/>).

References

1. Gabrielyan E.Ts. Rowan trees (*Sorbus* L.) of Western Asia and the Himalayas. Erevan: Izdatelstvo AN ArmSSR, 1978. 264 p. (in Russian).
2. Zaikonnikova T.I. Arctic flora of the USSR. Leningrad: Nauka, 1984. 118 p. (in Russian).
3. Petrov E.M. Rowan. M.: Selkhozgiz, 1957. 257 p. (in Russian).
4. Komarov V.L. Flora of the USSR. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1939. V. 8. 235 p. (in Russian).
5. Tolmachev A.I. Flora of the North-Eastern European part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1976. V. 3. 107 p. (in Russian).
6. Sokolov P.D. Plant resources of the USSR. Flowering plants, their chemical composition, and use. Families of Hydrangeaceae – Haloragaceae. Leningrad: Nauka, 1987. 326 p. (in Russian).
7. Fomenko S.E., Kushnerova N.F., Srygin V.G., Drugova E.S., Momot T.V. Chemical composition and biological activity of the rowanberry extract // Chemistry of plant raw material. 2015. V. 2. P. 161–168 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.201502571
8. Ivanova S.V., Shelepova O.V., Kirichenko E.B. Microelement composition of common mountain ash fruits (*Sorbus aucuparia* L.) // Vestnik of the Orenburg State University. 2005. No. 2S-2(40). P. 9–10 (in Russian).
9. MikulicPetkovsek M., Krska B., Kiproviski B., Veberic R. Bioactive components and antioxidant capacity of fruits from nine *Sorbus* genotypes // J. Food Sci. 2017. V. 82. No. 3. P. 647–658. doi: 10.1111/1750-3841.13643
10. Farhoosh R., Johnny S., Asnaashari M., Molaahmadibahraseman N., Sharif A. Structure–antioxidant activity relationships of *o*-hydroxyl, *o*-methoxy, and alkyl ester derivatives of *p*-hydroxybenzoic acid // Food Chem. 2016. V. 194. P. 128–134. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.003
11. Chen J., Yang J., Ma L., Li J., Shahzad N., Kim C.K. Structure–antioxidant activity relationship of methoxy, phenolic hydroxyl, and carboxylic acid groups of phenolic acids // Sci. Rep. 2020. V. 10. No. 1. Article No. 2611. doi: 10.1038/s41598-020-59451-z
12. Saini R.K., Keum Y.-S. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: dietary sources, metabolism, and significance – a review // Life Sci. 2018. V. 203. P. 255–267. doi: 10.1016/j.lfs.2018.04.049
13. Vázquez L., Corzo-Martínez M., Arranz-Martínez P., Barroso E., Reglero G., Torres C.F. Bioactive lipids // Bioactive molecules in food / Eds. J.-M. Mérillon, K.G. Ramawat. Cham: Springer, 2019. P. 467–527. doi: 10.1007/978-3-319-78030-6_58

14. Gladyshev M.I. Essential polyunsaturated fatty acids and their dietary sources for man // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2012. V. 5. No. 4. P. 352–386 (in Russian).
15. Lobayeva T.A. Study of the composition and content of fatty acids in herbal remedies // RUDN journal of medicine. 2015. No. 2. P. 9–18 (in Russian).
16. Harwood J.L. Recent advances in the biosynthesis of plant fatty acids // Biochim. Biophys. Acta, Lipids Lipid Metab. 1996. V. 1301. No. 1–2. P. 7–56. doi: 10.1016/0005-2760(95)00242-1
17. Arceusz A., Wesolowski M., Konieczynski P. Methods for extraction and determination of phenolic acids in medicinal plants: a review // Nat. Prod. Commun. 2013. V. 8. No. 12. P. 1821–1829. doi: 10.1177/1934578X1300801238
18. Wu Z., Zhang Q., Li N., Pu Y., Wang B., Zhang T. Comparison of critical methods developed for fatty acid analysis: a review // J. Sep. Sci. 2017. V. 40. No. 1. P. 288–298. doi: 10.1002/jssc.201600707
19. Lima-Pereira Y., de Souza E.M.O., dos Reis D.S., Barcellos-Silva I.G.C., Miki K.S.L., Veiga-Júnior V.F., Teixeira-Costa B.E. Current perspectives on the extraction, isolation, and identification of fats and fatty acids using conventional and green methods // Separations. 2025. V. 12. No. 6. Article No. 160. doi: 10.3390/separations12060160
20. Edo G.I., Nwachukwu S.C., Ali A.B.M., Yousif E., Jikah A.N., Zainulabdeen K., Ekokotu H.A., Isoje E.F., Igbuku U.A., Opiti R.A., Akpogheli P.O., Owhero J.O., Essagah A.E.A. A review on the composition, extraction and applications of phenolic compounds // Ecol. Front. 2025. V. 45. No. 1. P. 7–23. doi: 10.1016/j.ecofro.2024.09.008
21. Ruiz-Rodriguez A., Reglero G., Ibañez E. Recent trends in the advanced analysis of bioactive fatty acids // J. Pharm. Biomed. Anal. 2010. V. 51. No. 2. P. 305–326. doi: 10.1016/j.jpba.2009.05.012.
22. Becerra-Herrera M., Lazzoi M.R., Sayago A., Beltrán R., del Sole R., Vasapollo G. Extraction and determination of phenolic compounds in the berries of *Sorbus americana* Marsh and *Lonicera oblongifolia* (Goldie) Hook // Food Anal. Methods. 2015. V. 8. No. 10. P. 2554–2559. doi: 10.1007/s12161-015-0151-5
23. Cui H., Zhou J., Xu F., Lai C.Z., Wan G.H. Determination of phenolic compounds using high-performance liquid chromatography with Ce⁴⁺-Tween 20 chemiluminescence detection // Anal. Chim. Acta. 2004. V. 511. No. 2. P. 273–279. doi: 10.1016/j.aca.2004.01.046
24. Kivilompolo M., Obürka V., Hyötyläinen T. Comparison of GC–MS and LC–MS methods for the analysis of antioxidant phenolic acids in herbs // Anal. Bioanal. Chem. 2007. V. 388. No. 4. P. 881–887. doi: 10.1007/s00216-007-1298-8
25. Simirgiotis M.J., Silva M., Becerra J., Schmeda-Hirschmann G. Direct characterisation of phenolic antioxidants in infusions from four Mapuche medicinal plants by liquid chromatography with diode array detection (HPLC–DAD) and electrospray ionisation tandem mass spectrometry (HPLC–ESI–MS) // Food Chem. 2012. V. 131. No. 1. P. 318–327. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.07.118
26. Ribas-Agustí A., Gratacós-Cubarsí M., Sárraga C., García-Regueiro J.-A., Castellari M. Analysis of eleven phenolic compounds including novel *p*-coumaroyl derivatives in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by ultra-high-performance liquid chromatography with photodiode array and mass spectrometry detection // Phytochem. Anal. 2011. V. 22. No. 6. P. 555–563. doi: 10.1002/pca.1318
27. Barros L., Dueñas M., Ferreira I.C.F.R., Baptista P., Santos-Buelga C. Phenolic acids determination by HPLC–DAD–ESI/MS in sixteen different Portuguese wild mushrooms species // Food Chem. Toxicol. 2009. V. 47. No. 6. P. 1076–1079. doi: 10.1016/j.fct.2009.01.039
28. Gruzdev I.V., Zenkevich I.G., Kondratenok B.M. Derivatization in gas chromatographic determination of phenol and aniline traces in aqueous media // Russ. Chem. Rev. 2015. V. 84. No. 6. P. 653–664. doi: 10.1070/RCR4553
29. Parkinson D.R. Analytical derivatization techniques // Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering. Elsevier, 2014. 38 p. doi: 10.1016/b978-0-12-409547-2.11454-4
30. Moidoveanu S.C., David V. Derivatization reactions for analytes with various functional groups // Journal of chromatography library. Sample preparation in chromatography / Eds. S.C. Moidoveanu, V. David. Elsevier, 2002. V. 65. P. 639–845. doi: 10.1016/S0301-4770(02)80020-3
31. Smolarz H.D. Application of GC–MS method for analysis of phenolic acids and their esters in chloroformic extracts from some taxons of *Polygonum* L. genus // Chem. Anal. 2001. V. 46. No. 3. P. 439–444.
32. Citová I., Sladkovský R., Solich P. Analysis of phenolic acids as chloroformate derivatives using solid phase microextraction–gas chromatography // Anal. Chim. Acta. 2006. V. 573–574. P. 231–241. doi: 10.1016/j.aca.2006.04.077
33. Ichihara K., Fukubayashi Y. Preparation of fatty acid methyl esters for gas-liquid chromatography // J. Lipid Res. 2010. V. 51. No. 3. P. 635–640. doi: 10.1194/jlr.D001065.
34. Ifeanchio M.O., Ikewuchi C.C., Ikewuchi J.C. Investigation of the profile of phenolic compounds in the leaves and stems of *Pandiaka heudelotii* using gas chromatography coupled with flame ionization detector // Food Sci. Nutr. 2016. V. 5. No. 3. P. 646–652. doi: 10.1002/fsn3.443
35. Schummer C., Delhomme O., Appenzeller B.M.R., Wennig R., Millet M. Comparison of MTBSTFA and BSTFA in derivatization reactions of polar compounds prior to GC/MS analysis // Talanta. 2009. V. 77. No. 4. P. 1473–1482. doi: 10.1016/j.talanta.2008.09.043

36. Young R.F., Coy D.L., Fedorak P.M. Evaluating MTBSTFA derivatization reagents for measuring naphthenic acids by gas chromatography–mass spectrometry // *Anal. Methods*. 2010. V. 2. No. 6. P. 765–770. doi: 10.1039/c0ay00014k
37. Proestos C., Boziaris I.S., Nychas G.-J.E., Komaitis M. Analysis of flavonoids and phenolic acids in Greek aromatic plants: investigation of their antioxidant capacity and antimicrobial activity // *Food Chem.* 2006. V. 95. No. 4. P. 664–671. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.01.049
38. Proestos C., Sereli D., Komaitis M. Determination of phenolic compounds in aromatic plants by RP-HPLC and GC-MS // *Food Chem.* 2006. V. 95. No. 1. P. 44–52. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.12.016
39. Orata F. Derivatization reactions and reagents for gas chromatography analysis // *Advanced gas chromatography – progress in agricultural, biomedical and industrial applications* / Ed. M.M. Rijeka. IntechOpen, 2012. P. 83–108. doi: 10.5772/33098
40. Özcan M.M., Al Juhaimi F., Ahmed I.A.M., Babiker E.E., Ghafoor K. Antioxidant activity, fatty acid composition, phenolic compounds and mineral contents of stem, leave and fruits of two morphs of wild myrtle plants // *Food Measure*. 2020. V. 14. No. 3. P. 1376–1382. doi: 10.1007/s11694-020-00387-3
41. Gruzdev I.V., Veber N.E., Skrotskaya O.V. Isolation and determination of phenolic acids in rowanberry fruits (*Sorbus* L.) by gas chromatography // *Analytics and control*. 2024. V. 28. No. 2. P. 87–97 (in Russian). doi: 10.15826/analitika.2024.28.2.002
42. Platonova E.Yu., Golubev D.A., Zemskaya N.V., Shevchenko O.G., Patov S.A., Shaposhnikov M.V., Moskalev A.A. The antioxidant and geroprotective properties of an extract of mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) fruits // *Mol. Biol.* 2023. V. 57. No. 6. P. 978–992. doi: 10.1134/S0026893323060134
43. Mikhailova D.V., Shevchenko O.G., Golubev D.A., Platonova E.Y., Zemskaya N.V., Shoeva O.Y., Gordeeva E.I., Patov S.A., Shaposhnikov M.V., Khlestkina E.K., Moskalev A.A. Antioxidant properties and geroprotective potential of wheat bran extracts with increased content of anthocyanins // *Antioxidants*. 2023. V. 12. No. 11. Article No. 2010. doi: 10.3390/antiox12112010
44. Golubev D., Platonova E., Zemskaya N., Shevchenko O., Shaposhnikov M., Nekrasova P., Patov S., Ibragimova U., Valuisky N., Borisov A., Zhukova X., Sorokina S., Litvinov R., Moskalev A. *Berberis vulgaris* L. extract supplementation exerts regulatory effects on the lifespan and healthspan of *Drosophila* through its antioxidant activity depending on the sex // *Biogerontology*. 2024. V. 25. No. 3. P. 507–528. doi: 10.1007/s10522-023-10083-6
45. Shevchenko O.G. Investigation of certain aspects of the studies of antioxidants in heterogeneous systems, oil-in-water emulsions // *Russ. Chem. Bull.* 2024. V. 73. No. 12. P. 3471–3486. doi: 10.1007/s11172-024-4464-7
46. Günter E.A., Popeyko O.V., Shevchenko O.G., Vityazev F.V., Modification of texture and *in vitro* digestion of pectin and κ -carrageenan food hydrogels with antioxidant properties using plant cells // *Int. J. Biol. Macromol.* 2025. V. 316. Article No. 144682. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.144682
47. Adaeva O.I., Demchuk D.V., Shevchenko O.G., Semenova M.N., Semenov V.V. Apiol from parsley seeds as a source for the synthesis of coenzyme Q₀ propanoic acid conjugates with amines featuring antioxidant activity // *ACS Omega*. 2026. V. 11. No. 18. P. 26195–26205. doi: 10.1021/acsomega.5c09328
48. Sevgi K., Tepe B., Sarikurkcu C. Antioxidant and DNA damage protection potentials of selected phenolic acids // *Food Chem. Toxicol.* 2015. V. 77. P. 12–21. doi: 10.1016/j.fct.2014.12.006
49. Celik S.E., Ozyürek M., Güçlü K., Apak R. Solvent effects on the antioxidant capacity of lipophilic and hydrophilic antioxidants measured by CUPRAC, ABTS/persulphate and FRAP methods // *Talanta*. 2010. V. 81. No. 4–5. P. 1300–1309. doi: 10.1016/j.talanta.2010.02.025
50. Boulebd H., Zine Y., Khodja I.A., Mermer A., Demir A., Debache A. Synthesis and radical scavenging activity of new phenolic hydrazone/hydrazide derivatives: experimental and theoretical studies // *J. Mol. Struct.* 2022. V. 1249. Article No. 131546. doi: 10.1016/j.molstruc.2021.131546
51. Romera-Castillo C., Jaffé R. Free radical scavenging (antioxidant activity) of natural dissolved organic matter // *Mar. Chem.* 2015. V. 177. Pt. 4. P. 668–676. doi: 10.1016/j.marchem.2015.10.008
52. Wu C.R., Lin W.H., Hseu Y.C., Lien J.C., Lin Y.T., Kuo T.P., Ching H. Evaluation of the antioxidant activity of five endemic *Ligustrum* species leaves from Taiwan flora *in vitro* // *Food Chem.* 2011. V. 127. No. 2. P. 564–571. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.01.041.
53. Kim J.S. Preliminary evaluation for comparative antioxidant activity in the water and ethanol extracts of dried citrus fruit (*Citrus unshiu*) peel using chemical and biochemical *in vitro* assays // *Food Nutr. Sci.* 2013. V. 4. No. 2. P. 177–188. doi: 10.4236/fns.2013.42025
54. Stefanello S.T., Prestes A.S., Ogunmoyole T., Salman S.M., Schwab R.S., Brender C.R., Dornelles L., Rocha J.B.T., Soares F.A.A. Evaluation of *in vitro* antioxidant effect of new mono and diselenides // *Toxicol. in Vitro*. 2013. V. 27. No. 5. P. 1433–1439. doi: 10.1016/j.tiv.2013.03.001
55. Korenman Ya.I. Extraction of Phenols. Gorkiy: Volgo-Vyatskoe izdatelstvo, 1973. 214 p. (in Russian).
56. Ribeiro C., Ribeiro A.R., Maia A.S., Gonçalves V.M.F., Tiritan M.E. New trends in sample preparation techniques for environmental analysis // *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2014. V. 44. No. 2. P. 142–185. doi: 10.1080/10408347.2013.833850
57. Mokrani A., Madani K. Effect of solvent, time and temperature on the extraction of phenolic compounds

and antioxidant capacity of peach (*Prunus persica* L.) fruit // Sep. Purif. Technol. 2016. V. 162. P. 68–76. doi: 10.1016/j.seppur.2016.01.043

58. Acquavia M.A., Pascale R., Foti L., Carlucci G., Scrano L., Martelli G., Brienza M., Coviello D., Bianco G., Lelario F. Analytical methods for extraction and identification of primary and secondary metabolites of apple (*Malus domestica*) fruits: a review // Separations. 2021. V. 8. No. 7. Article No. 91. doi: 10.3390/separations8070091

59. Reichardt C., Welton T. Solvents and solvent effects in organic chemistry. Weinheim: John Wiley & Sons, 2011. 718 p.

60. Jia Y., He Y., Lu F. The structure–antioxidant activity relationship of dehydrodiferulates // Food Chem. 2018. V. 269. P. 480–485. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.07.038

61. Kikuzaki H., Hisamoto M., Hirose A., Akiyama K., Taniguchi H. Antioxidant properties of ferulic acid and its related compounds // J. Agric. Food Chem. 2002. V. 50. No. 7. P. 2161–2168. doi: 10.1021/jf011348w

62. Kiokias S., Proestos C., Oreopoulou V. Phenolic acids of plant origin – a review on their antioxidant activity *in vitro* (O/W emulsion systems) along with their *in vivo* health biochemical properties // Foods. 2020. V. 9. No. 4. Article No. 534. doi: 10.3390/foods9040534