



## Список литературы

1. *Drews G. N., Lee D., Christensen C. A.* Genetic Analysis of Female Gametophyte Development and Function // *Plant Cell*. 1998. Vol. 10. P. 5–17.
2. *Yadegari R., Drews G. N.* Female gametophyte development // *Plant Cell*. 2004. Vol. 16. P. 133–141.
3. *Enaleeva N. Kh.* Experimental production of gametophyte mutants // *Proc. of the XI Intern. symp. «Embryology and seed reproduction»*. St.-Petersburg, 1992. P. 143–144.
4. *Enaleeva H. X.* Внутривидовая изменчивость зародышевых мешков покрытосеменных растений : Теоретические и прикладные аспекты на примере *Nicotiana tabacum* L. : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Саратов, 2000. 350 с.
5. *Колесова А. Ю.* Цитологический и генетический механизмы редукции числа элементов в зародышевых мешках гаметофитного мутанта *Nicotiana tabacum* L. : автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2000. 19 с.
6. *Николаева Н. Ю., Колесова А. Ю.* Характеристика женского гаметофита мутанта *Nicotiana tabacum* L. с увеличенным числом элементов в зародышевых мешках // *Бюл. Бот. сада Сарат. гос. ун-та*. 2006. № 5. С. 343–348.
7. *Enaleeva H. X., Тырнов В. С., Хохлов С. С.* Выделение зародышевых мешков покрытосеменных растений путем мацерации тканей // *Цитология и генетика*. 1972. Т. 6, № 5. С. 439–441.

## Образец для цитирования:

Парфирова И. В., Лобанова Л. П., Колесова А. Ю. Особенности строения женского гаметофита двух мутантных линий *Nicotiana tabacum* L. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 425–428. DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-4-425-428.

УДК 595.76; 595.796; 59.087; 57.024

## АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ ПРИ КОММУНИКАЦИИ МУРАВЬЁВ РОДА *FORMICA* (HYMENOPTERA: FORMICIDAE) И ЖУКОВ РОДА *SCYDMAENUS* (COLEOPTERA: STAPHYLINIDAE)

Е. Ю. Рига, В. В. Аникин

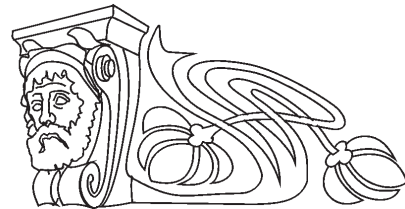
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского  
E-mail: vasanikin@gmail.com

В статье приведены данные по классификации и кластеризации акустических сигналов при коммуникации мирмекофильных жесткокрылых (*Scydmaenus hellwigii*) с муравьями (*Formica rufa*). Впервые для представителей этих видов с помощью кластерного анализа было выявлено четыре кластера, каждому из которых соответствует своя команда от жука к муравью. Для каждой команды были определены специфические диапазоны доминирующих частот и диапазоны средних амплитуд (значения параметров R). **Ключевые слова:** жуки-мирмекофилы, муравьи, коммуникация, математическая кластеризация, математическая классификация.

### Acoustic Communication Signals between Ants of the Genus *Formica* (Hymenoptera: Formicidae) and Myrmecophilous Beetles of the Genus *Scydmaenus* (Coleoptera: Staphylinidae)

E. Yu. RIGA, V. V. ANIKIN

In the article was given the mathematical approaches to classification and clustering of data of acoustic signals in communication between myrmecophilic beetles (*Scydmaenus hellwigii*) and ants (*Formica rufa*). For the first time for these species were used a cluster analysis which revealed four clusters, each of them has its own command from the



beetle to the ant. Each command was defined by specific ranges of dominant frequencies and a range of medium amplitudes (the values of the parameters R).

**Key words:** myrmecophilous beetles, ants, communication, mathematical clustering, mathematical classification.

DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-4-428-433

### Введение

Муравейник – это сложный организм, взаимодействие внутри которого происходит благодаря химическому и акустическому сигналам. Существуют виды муравьёв и других беспозвоночных, которые, взаимодействуя друг с другом, образуют особые симбиотические отношения. Данный тип отношений получил название «мирмекофилия». Такие представители, как гусеницы бабочек рода *Maculinea* (сем. Lycaenidae), жуки рода *Lomechusa* (сем. Staphylinidae) – типичные обитатели муравейников [1, 2]. Успех их выживания заключается в том, что они научились подражать химическому сигналу



муравьёв. Акустический сигнал имитировать намного сложнее, но всё же насекомым это удалось сделать. В частности, примером таких групп являются мирмекофильные жесткокрылые из семейства Staphylinidae.

Актуальность данной работы обусловлена недостаточной изученностью биоакустических сигналов муравьёв и мирмекофильных жесткокрылых при их совместном существовании. Объектами исследуемой работы являются мирмекофильные жесткокрылые *Scydmaenus helwigii* Herbst, 1792, обитающие в симбиозе с муравьями *Formica rufa* Linnaeus, 1761.

### Цели и задачи

Тема настоящего исследования – установление параметров звуковых сигналов коммуникации между муравьями и мирмекофильными жесткокрылыми. Новизна исследования заключается в том, что никогда ранее не изучались акустические сигналы данных представителей на территории Российской Федерации.

Цель – установить наличие коммуникационных акустических сигналов между муравьями *Formica rufa* и жуками *Scydmaenus helwigii*.

В задачи исследований входили фиксация акустических сигналов различных каст муравьёв (матка, рабочие и солдаты), акустических сигналов мирмекофильных жесткокрылых, определение пола *Scydmaenus helwigii*, который издаёт характерные стрекотания, проведение прямого эксперимента по ответной реакции различных каст муравьёв на воспроизведение звуковых сигналов своих сородичей и мирмекофильных жесткокрылых, кластеризация и классификация воспроизводимых сигналов.

### Материал и методы

Сбор материала производился летом 2015 г. на территории природного парка «Кумысная поляна» в окрестностях города Саратова. В ходе полевых исследований методом ручного сбора отбирались жуки и муравьи из 20 муравейников разных популяций. Из каждого муравейника собирались в ходе разлёта: 1 матка, 4–5 рабочих особей, 4–5 солдат, 7 особей жуков. Насекомые помещались в инкубатор. После транспортировки особи некоторое время оставались в инкубаторе для дальнейшего размножения колонии. Колонии, где популяция достигала 50–60 экземпляров, переселялась в формикарий. После заселения в 7 формикариев, где были созданы искусственные условия, в каждом формикарии находилось около 100–150 особей муравьёв и 35–40 жуков.

Для записи звуков использовалась система активного шумоподавления собственной сборки, состоящая из 2 микрофонов, двухканального сверхмалошумящего усилителя звуковой частоты, внешнего автономного источника электрического тока (аккумулятора) и ноутбука с предустановленным программным обеспечением для записи и обработки звука. В качестве записывающего устройства использовался ноутбук с предустановленным на него звуковым редактором Sony Sound Forge. Микрофон подключался к ноутбуку посредством линейного входа (разъём для подключения микрофона). Для увеличения амплитуды интересующего записываемого звука использовался двухканальный сверхмалошумящий усилитель звуковой частоты на микросхеме K548УН1А (зарубежный аналог LM381А), имеющий следующие характеристики: коэффициент усиления по напряжению – 200; напряжение шума, приведенного ко входу <0.7 мкВ; напряжение питания – 12–18 В; коэффициент гармонических искажений <0.1%; ЭППЧ – 20–20000 Гц.

Для исключения из записи окружающих шумов была использована схема активного шумоподавления из 2 микрофонов. Один из них помещается в пробирку (левый канал), другой за стенку пробирки (правый канал). Это необходимо для того, чтобы в последующем исключить лишний шум (правый канал) из записи (левого канала). Запись проводилась в течение двух месяцев (август–сентябрь), вечером, при комнатной температуре и естественном освещении. Для записи каждый экземпляр помещали в пробирку, производили запись в течение 3 минут. Далее из того же формикария брали представителя другой касты и опять проводили запись. Затем брали ещё одного представителя и так далее. После записи муравьёв из 6 формикариев аналогичным образом проводили запись мирмекофильных жесткокрылых. Записи делали в трехкратной последовательности каждый день.

После получения записей проводилась их очистка. Для этого амплитуда звукового сигнала, полученного с внешнего микрофона, была изменена таким образом, чтобы она равнялась амплитуде шума в записи, полученного из внутреннего микрофона. После этого полученный звуковой сигнал был инвертирован и сложен с записью с внутреннего микрофона. В результате получалась запись, содержащая только полезный сигнал с внутреннего микрофона, без шумов, так как в результате проведенных операций шумы были полностью компенсированы. Записи сохранялись в формате \*.WAV. Затем выбирали наилучшие



образцы записей, а из каждого формикария по кастам выбирали муравьев и, поочередно включая сигналы каждой касты, наблюдали дальнейшую реакцию отдельных особей. После этого включали различные звуки мирмекофильных жесткокрылых и также фиксировали реакцию муравьев.

Для извлечения значений характеристик из записей звуковых сигналов использовался инструмент «Статистика» (Statistics) в программе Sony Sound Forge. Эксперименты по наблюдению за реакцией муравьев на своих сородичей и мирмекофильных жесткокрылых были статистически обоснованы с помощью критерия согласия Пирсона. Задача математической обработки

была решена с помощью кластерного анализа и в развернутом виде была представлена авторами ранее [3].

### Результаты и их обсуждение

В ходе лабораторных экспериментов были проведены работы по фиксации звуковых сигналов жуков и различных групп муравьев. Скриншот результатов работы инструмента «Статистика» приведён на рис. 1.

Скриншоты осциллограмм из программы Sony Sound Forge и спектрограмм из программы Adobe Audition записей звуковых сигналов представлены на рис. 2.

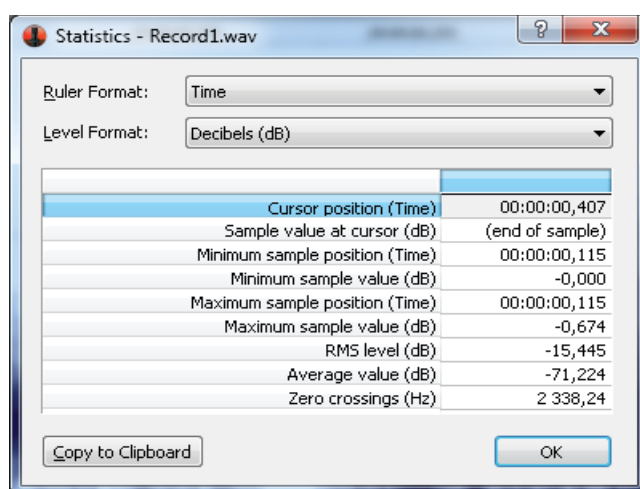


Рис. 1. Статистические данные аудиозаписи *Scydmaenus helwigii* (скриншот программы Sony Sound Forge)

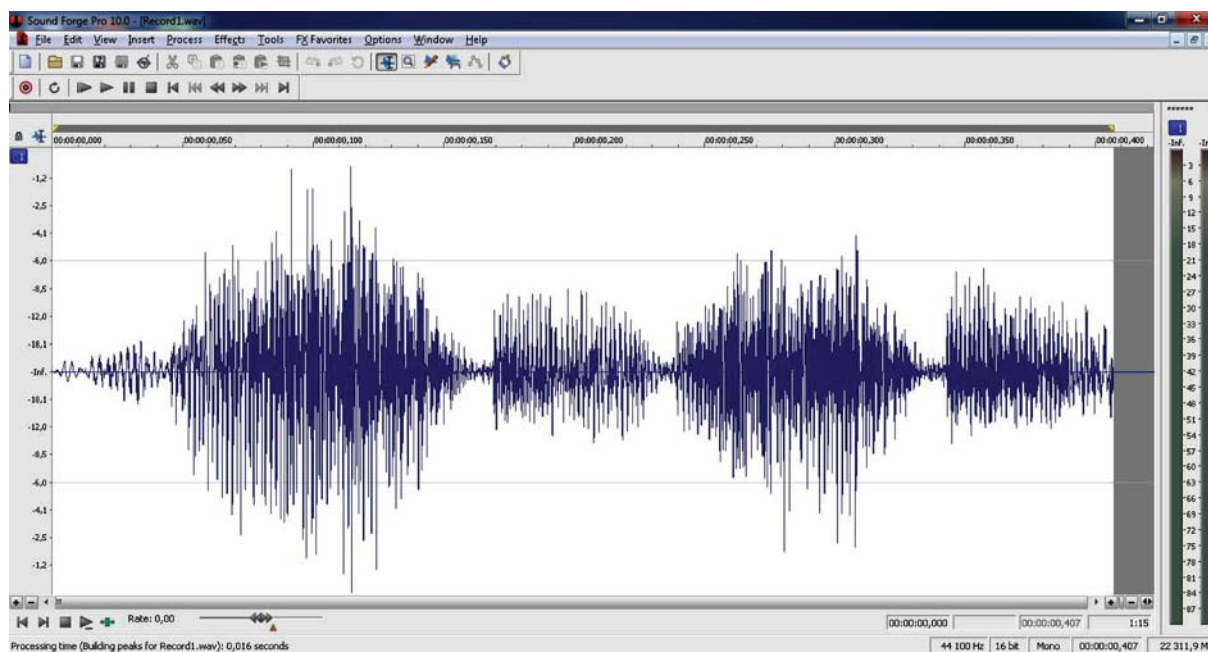


Рис. 2. Запись мирмекофильного жесткокрылого *Scydmaenus helwigii* (скриншот программы Sony Sound Forge)



После установления и фиксации звуковых сигналов всех групп муравьёв и жуков были проведены эксперименты по соответствию команд, как между муравьями, так и между жуками и муравьями.

Для установления взаимно однозначного соответствия между конкретными командами и конкретными кластерами было проведено 2 серии по 4 статистических эксперимента. В первой серии были задействованы муравьи-солдаты, во второй серии – рабочие муравьи. В каждом эксперименте участвовало по 100 муравьёв, которых мы разделили на 2 группы по 50 муравьёв соответственно. Первой группе с помощью миниатюрного динамика воспроизводились аудиозаписи, соответствующие определённой команде. Муравьи из второй группы служили контролем – им воспроизводили аудиозаписи, которые не соответствуют никаким командам (белый шум). Важно было воспроизводить записи с амплитудой, максимально приближенной к реальной. Целью эксперимента была проверка гипотезы о том, что воспроизведение аудиозаписи, которой соответствует определённая команда, не оказывает никакого влияния на частоту выполнения интересующей нас команды. Иными словами, мы утверждали, что наблюдаемые различия в частотах выполнения действий в первой и во второй группах совершенно случайны и не связаны с закодированной в аудиосигнале командой. Для этого для каждого эксперимента строилась таблица сопряженности.

В нашем случае таблицы имели размерность  $2 \times 2$ , т.е. 2 класса объектов («Сигнал с закодированной командой» и «Другой сигнал»), которые исследовались по двум признакам («Выполнено» и «Не выполнено»). Для проверки сформулированной выше гипотезы нам необходимо было узнать, какова была бы ситуация, если бы закодированная в аудиосигнале команда действительно не оказывала никакого влияния на частоту выполнения команды. Другими словами, нужно было рассчитать *ожидаемые частоты* для соответствующих ячеек таблицы сопряженности. Так, в первом эксперименте при воспроизведении аудиосигнала с закодированной командой эта команда была выполнена 28 раз и не выполнена 22 раза. При воспроизведении другого сигнала (белого шума) была выполнена 14 раз и не выполнена 36 раз. Значения таблицы сопряженности для первого эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Таблица сопряженности с полученными частотами

Показатель	Выполнено	Не выполнено	Всего
Сигнал	28	22	50
Другой сигнал	14	36	50
Итого	42	58	100

Всего команда была выполнена  $28+14=42$  раза и не выполнена  $22+36=58$  раз. Если закодированная в аудиозаписи команда не влияет на частоту выполнения и невыполнения команды, в обеих экспериментальных группах (при воспроизведении аудиозаписи с закодированным сигналом и при воспроизведении аудиозаписи с белым шумом) должен был наблюдаться одинаковый процент выполнения и невыполнения команды. Узнали, сколько процентов составляет 42 и 58 от общего числа воспроизведений (в нашем случае от 100) – это 42 и 58% соответственно. Вычислив, чему равно 42 и 58% от 50, получили 21 и 29 соответственно. Это и были ожидаемые величины в наших экспериментальных группах. Была составлена новая таблица сопряженности с ожидаемыми частотами (табл. 2).

Таблица 2

Таблица сопряженности с ожидаемыми частотами

Показатель	Выполнено	Не выполнено	Всего
Сигнал	21	29	50
Другой сигнал	21	29	50
Итого	42	58	100

После этого были произведены сравнения показателей из табл. 1 и табл. 2. Для этого использовался критерий согласия Пирсона ( $\chi^2$  «хи-квадрат»).

Далее было определено, достаточно ли велико полученное значение  $\chi^2$ , чтобы отклонить нашу гипотезу. Для этого было найдено соответствующее критическое значение критерия. Число степеней свободы для  $\chi^2$  было рассчитано по формуле

$$df = (R - 1) \times (C - 1),$$

где  $R$  – количество строк в таблице сопряженности;  $C$  – количество столбцов в таблице сопряженности.

В нашем случае  $df = (2 - 1) \times (2 - 1) = 1$ . Зная число степеней свободы, было получено критическое значение  $\chi^2$  для уровня значимости 0.01, которое равно 6.635.

Таким образом, при одной степени свободы только в 1% случаев величина критерия  $\chi^2$  превышала 6.635. Полученное нами значение 8.046 значительно превышало это критическое значение, что дало нам право отвергнуть гипотезу об отсутствии связи между закодированной в аудиосигнале команде и частотой выполнения этой команды. Отвергая эту гипотезу, мы могли ошибиться с вероятностью менее 1%. Были сделаны таблицы сопряженности и рассчитаны значения  $\chi^2$  для всех 8 экспериментов. Все 8 полученных значений  $\chi^2$  значительно превысили критическое





значение, что позволило нам отвергнуть выдвинутую гипотезу и утверждать, что взаимосвязь между закодированной в аудиосигнале командой и выполнением этой команды является статистически обоснованной. Это позволило нам с вероятностью 99% установить взаимно-однозначное соответствие между конкретными командами и конкретными кластерами.

В результате проведенных исследований было получено, что количество кластеров в нашем случае равно четырём. Центром первого кластера является вектор (1766 Гц; -11.5 дБ),

центром второго – (2331 Гц; -22.05 дБ), центром третьего – (2939 Гц; -6.2 дБ), центром четвертого – (3249 Гц; -21.15 дБ). Значение параметра R по частоте для первого кластера равно 304 Гц, по амплитуде – 5.3 дБ. Значение параметра R по частоте для второго кластера равно 174 Гц, по амплитуде – 3.15 дБ. Значение параметра R по частоте для третьего кластера равно 176 Гц, по амплитуде – 2.1 дБ. Значение параметра R по частоте для четвертого кластера равно 126 Гц, по амплитуде – 6.35 Гц. Графическое представление кластеров изображено на рис. 3.

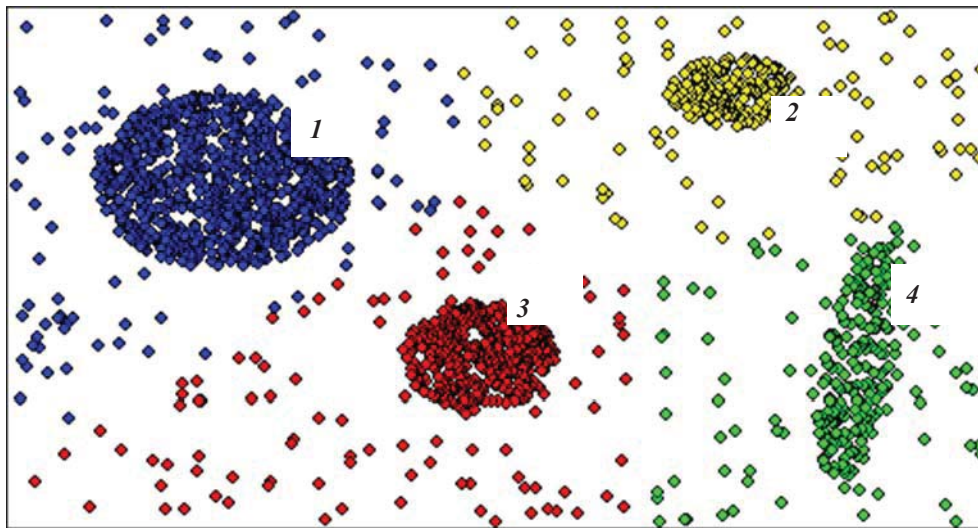


Рис. 3. Графическое представление объектов для кластерного анализа: 1 – перенести яйца; 2 – принести еду; 3 – защищать колонию; 4 – рыть камеру (графическое представление объектов выполнено в сервисе Wolfram Alpha)

В результате воспроизведения образцов из каждого кластера можно определить соотношение между конкретным кластером и конкретной командой. Записям из первого кластера соответствует команда «перенести яйца», записям из второго кластера – «принести еду», записям из третьего кластера – «защищать колонию», записям четвертого кластера – «рыть новую камеру». Стрекотания матки *F. rufa* соответствуют записям из первого, третьего и четвертого кластеров. Стрекотания солдата *F. rufa* – из четвертого кластера. Стрекотания рабочего *F. rufa* – из второго и третьего кластеров. Стрекотания мирмекофильного жесткокрылого *S. hellwigii* – из всех четырех кластеров. Этот факт свидетельствует о том, что данный представитель мирмекофильных жесткокрылых может подражать всем кастам муравьев. Такая способность была приобретена в результате эволюционного развития, чтобы увеличить шансы на выживаемость в муравейнике.

### Выводы

В ходе проведенных исследований и на основе полученных экспериментальных данных были сделаны следующие выводы:

- 1) общение мирмекофильных жесткокрылых и муравьев происходит не только химически, но и с помощью звуковых сигналов;
- 2) мирмекофилы с помощью звука подражают всем кастам муравьев;
- 3) муравьи выполняют различные команды *Scydmaenus hellwigii* (перенести яйца, принести пищу и т.д.);
- 4) для каждого отдельного формикурия со своей семьей (отдельные касты) наблюдается свой диапазон издаваемых звуков;
- 5) с помощью кластерного анализа было выявлено четыре кластера, каждому из которых соответствует своя команда;
- 6) для каждой команды были определены специфические диапазоны доминирующих ча-



стот и диапазоны средних амплитуд (значения параметров R).

### Заключение

Изучение биоакустики мирмекофильных жесткокрылых и муравьёв началось относительно недавно. Настоящее исследование является одним из первых в России, в котором объясняется роль акустического канала при взаимодействии муравьёв *F. rufa* и мирмекофильных жесткокрылых *S. hellwigii*. Было установлено, что звуковые сигналы действуют «независимо» от химических сигналов или превосходят их по характеру и направленности деятельности. Выполнялись такие сложнейшие задачи, как: создание и поддержание оптимальных условий для существования колонии муравьёв и мирмекофильных жесткокрылых; конструирование устройства для записи интересующих звуков; выбор программного обеспечения для обработки звука; выбор мето-

дов очистки шумов из интересующих записей; непосредственное проведение эксперимента; математическая обработка данных.

### Список литературы

1. Гребенников К. А., Рига Е. Ю. История изучения жуков-мирмекофилов Среднего и Нижнего Поволжья // Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье. Саратов, 2014. Вып. 11. С. 26–30.
2. Сажнев А. С., Рига Е. Ю., Забалуев И. А. Новые виды мирмекофильных жесткокрылых для фауны Саратовской области // Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье. Саратов, 2015. Вып. 12. С. 71–74.
3. Рига Е. Ю., Аникин В. В. Использование математического аппарата при изучении акустических сигналов коммуникации муравьёв рода *Formica* (Hymenoptera: Formicidae) и жуков рода *Scydmaenus* (Coleoptera: Staphylinidae) // Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье. Саратов, 2016. Вып. 13. С. 52–55.

### Образец для цитирования:

Рига Е. Ю., Аникин В. В. Акустические сигналы при коммуникации муравьёв рода *Formica* (Hymenoptera: Formicidae) и жуков рода *Scydmaenus* (Coleoptera: Staphylinidae) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 428–433. DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-4-428-433.

УДК 543.51+ 547.814.5

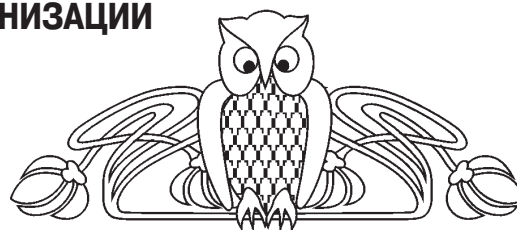
## ФРАГМЕНТАЦИЯ КВЕРЦЕТИНА И НАРИНГЕНИНА, А ТАКЖЕ ФОТОИНДУЦИРУЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОЙ ДЕСОРБЦИИ И ИОНИЗАЦИИ

В. С. Гринёв<sup>1,2</sup>, С. А. Коннова<sup>1,2</sup>, В. В. Игнатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, Саратов

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

E-mail: grinev@ibppm.ru



Обнаружено, что в условиях лазерной десорбции и ионизации кверцетин, принадлежащий ряду флавонолов, претерпевает распад путём фотоиндуцируемой реакции с последующей димеризацией образующегося бирадикала и дальнейшей фрагментацией димера. Нарингенин, относящийся к ряду флавононов, также претерпевает аналогичную фрагментацию, однако из-за отсутствия сопряжения в кольце С образующаяся бирадикальная частица не способна к дальнейшей димеризации по аналогичной кверцетину схеме вследствие своей малой устойчивости. В спектрах обнаружены сигналы С–С димера нарингенина и его фрагментарного иона, сделано предположение об их возможных структурах.

**Ключевые слова:** флавоноиды, масс-спектрометрия, лазерная десорбция и ионизация, фотохимический процесс.

### Fragmentation of Quercetin and Naringenin and Photoinduced Processes under Laser Desorption/Ionization Conditions

V. S. Grinev, S. A. Konnova, V. V. Ignatov

We found that under laser desorption and ionization conditions, quercetin, belonging to the flavonol family, undergoes a decay, which occurs through a photoinduced reaction followed by dimerization of the forming biradical and by the subsequent fragmentation of the dimer. Naringenin, belonging to the flavonone family, also undergoes similar fragmentation, but owing to the lack of conjugation in the C ring, the forming biradical particle is not capable of further dimerization in the same way as observed for quercetin