

---

---

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

---

УДК.595.771:591.174

### АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗУЧАЕМЫМ ОБЪЕКТАМ (НАСЕКОМЫМ)

*Махмудова Алида Фаик кызы, студентка, Астраханский государственный университет, 414056, Россия, Астрахань, Татищева, 20 а, e-mail: waiste15@bk.ru.*

*Лихтер Анатолий Михайлович, доктор технических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Россия, Астрахань, Татищева, 20 а, e-mail: kof@aspu.ru.*

*В данной работе приведены основные элементы биокibernетической системы управления поведением насекомых. Проанализированы возможности передачи информации, содержащейся в акустическом сигнале, изучаемым объектам, в частности насекомым. Приведены основные органы насекомых, выступающих в качестве приемника звукового сигнала. Определен диапазон чувствительности приведенных органов. Установлены основные задачи слуховых анализаторов насекомых. Проанализированы технологии воздействия на поведение насекомых, предлагаемых современным рынком. Разработано и сконструировано устройство для привлечения комаров на основе комплексного воздействия на их рецепторные системы. В ходе анализа результатов проведенного эксперимента выделена пороговая частота воздействия на самок комаров и определен один из параметров БКС. Сделаны предпосылки для создания математической модели управления поведением насекомых с помощью акустических сигналов.*

**Ключевые слова:** акустический сигнал, насекомые, биокibernетические системы, управление биологическими объектами, акустический канал связи, интеграл Фурье, математическая модель.

### ANALYSIS OF THE TRANSMISSION OF ACOUSTIC INFORMATION STUDIED OBJECTS (INSECTS)

*Makhmudova Alida F., student, Astrakhan State University, 414056, Russia, Astrakhan, Tatishcheva, 20 a, e-mail: waiste15@bk.ru.*

*Lichter Anatoly M., Ph.D., Associate Professor, Astrakhan State University, 414056, Russia, Astrakhan, Tatishcheva, 20 a, e-mail: kof@aspu.ru.*

*This paper presents the basic elements of biocybernetic behavior control of insects. The possibilities of transmission of the information contained in the acoustic signal, the objects of study, in particular insects are analyzed. The basic organs of insects, acting as the signal receivers are shown. The range of sensitivity of the above bodies is defined. The key tasks of auditory analyzers insects is identified. Have been analyzed the impact of technology on the behavior of insects offered by the modern market. The device for attracting mosquitoes to an integrated impact on their receptor systems is designed and constructed. During the analyzing of the experiment results highlighted the threshold frequency effects on female mosquitoes and identified one of the BCS options. Preconditions for creation of mathematical model of management by behavior of insects by means of acoustic signals have been made.*

**Key words:** acoustic signal, insects, bio-cybernetic systems we manage biological objects, acoustic communication channel, the Fourier integral, the mathematical model.

В мире насекомых удивительно все: разнообразие видов, большая численность особей, образ жизни, многообразие и гармоничность в строении организмов, необъяснимое поведение как отдельных особей, так и семейств или колоний. Насекомым принадлежит весьма важная роль в многозвенной экологической цепи. Их поведение в заданных условиях отличается согласованностью. Насекомые имеют рецепторы, воспринимающие сигналы из внешней среды, возможность анализа полученных сигналов и адекватное реагирование на полученный сигнал, несущий информацию, содержащуюся в акустической, электромагнитной, (тепловой) или оптической форме. Такое взаимное соответствие характерно для биокибернетических систем (БКС) и позволяет управлять поведением насекомых.

Биокибернетическая система для управления поведением насекомых состоит из трех последовательно взаимодействующих элементов: источника физического поля, внешней среды, т.е. канала передачи информации и объекта управления, причем эффективное управление в БКС можно осуществить после выбора оптимальных параметров, входящих в нее элементов на основе энергетических (уровень сигнала) и информационных (отношение «сигнал – шум») критериев качества (рис. 1). В свою очередь, решение этой задачи возможно при наличии математической модели, описывающей как прохождение управляющего сигнала в БКС, так и шумовые характеристики ее элементов. Необходимо определить параметры этих элементов.

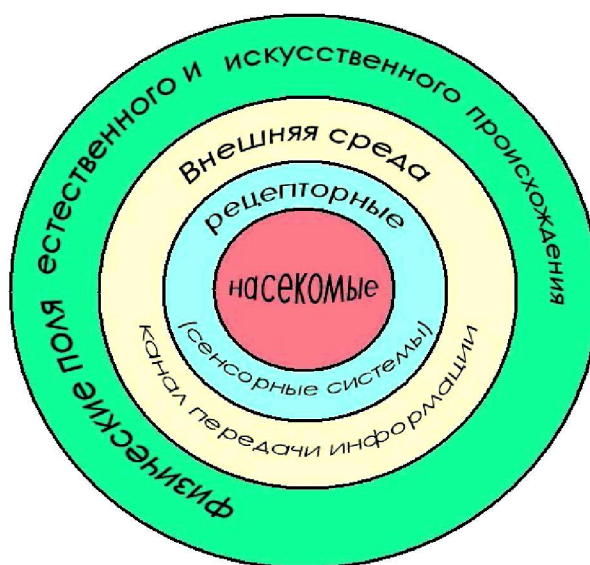


Рис. 1. Биокибернетическая система для управления поведением насекомых

При разработке и проектировании устройств для управления кровососущими насекомыми, вредителями сельскохозяйственных растений одним из важных каналов передачи информации является акустический канал, в связи с чем изучение акустического фона элементов биокибернетических систем является необходимой и весьма важной задачей.

Физические поля естественного или искусственного происхождения, такие, как оптическое, электромагнитное и акустическое, могут быть положены в основу технических устройств для управления поведением насекомых. Отдельным видам полей соответствуют рецепторы и органы насекомых, которые эти поля воспринимают. Воздушная, жидкая или твердая среды являются акустическим каналом связи для передачи информации насекомым. Соответственно этому насекомые пользуются разными рецепторами. Они отличаются морфологически и функционально. У многих насекомых акустическая связь служит важным

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

«средством общения» между особями одного вида. Восприятие звуков через воздух или воду осуществляется *фонорецепторами*, которые сходны по функционированию, но отличаются по локализации на теле. Сходство основано на использовании в качестве первичных преобразователей акустических колебаний тонких кутикулярных мембран, находящихся в натянутом состоянии. Колебания мембран под действием звуковых волн возбуждают нервные клетки, которые взаимодействуют с мембранами непосредственно или через промежуточные структуры.

Насекомые воспринимают звуковые колебания с помощью волосковых сенсилл, джонстоновых и тимпанальных органов. Рецепторы низкочастотных акустических и электрических колебаний, у которых в качестве первичного преобразователя используются волоски, впервые были обнаружены у пчел [1, 6]. Специализированные фонорецепторы – тимпанальные органы обнаружены у многих видов насекомых. Тимпанальные органы реагируют как на звуковое давление, так и на градиент. Основным приемником звука служит тимпанальная мембрана. Рецепторы тимпанального органа отвечают разрядами импульсов на звуковые раздражения. Амплитуда РП и частота импульсов в разряде увеличиваются с возрастанием интенсивности звука. Таким образом, тимпанальные органы могут передавать в нервную систему информацию об интенсивности звука, длительности звуковых посылок и закономерностях их повторения. У сверчков и кузнечиков тимпанальные органы локализируются в голених передней пары ног. У цикад, саранчовых и некоторых видов бабочек тимпанальные органы локализируются в брюшном или грудном отделах. Самая низкая виброчувствительность обнаружена у мух-пчеловидок, самая высокая – у тараканов. У первых максимум чувствительности находится на частоте около 200 Гц, у вторых – 1400 Гц, а воспринимаемая минимальная амплитуда колебаний на указанных частотах равняется соответственно 6590 и 0,004 нм. У разных видов прямокрылых тимпанальные органы могут сильно различаться по их чувствительности к частоте звуковых колебаний. Тимпанальные органы саранчовых проявляют максимальную чувствительность в диапазоне звуков от 2 до 15 кГц (рис. 2). Так как в тимпанальном органе присутствуют рецепторы нескольких групп, то часть из них, взаимодействующая с жестким и тонким участком мембраны, настроена на восприятие высокочастотных звуков (от 15 до 20 кГц), а остальные более чувствительны к звукам низкой частоты (от 4 до 6 кГц).

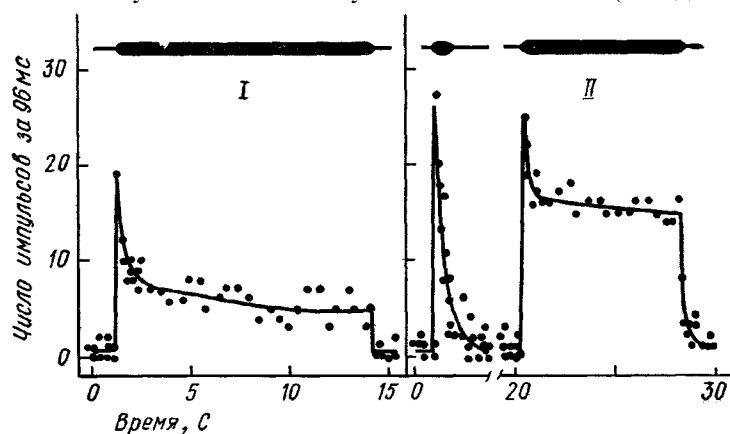


Рис. 2. Адаптация двух сенсорных нейронов из тимпанального органа саранчи *Schistocerca gregaria* к звуковому раздражению (3 кГц) интенсивностью 80 дБ (I) и 90 дБ (II): толстые линии над графиками – длительность раздражения [5]

Двукрылые насекомые воспринимают звуки с помощью джонстоновых органов. Самцы кровососущих комаров обладают гипертрофированными джонстоновыми органами, с помощью которых комары воспринимают акустические колебания, издаваемые крыльями

другой особи, а также все внешние шумы. Расположены эти органы во втором членике антенн. Антенны самцов являются резонансными структурами, остро настроенными на основную частоту звука полета самки того же вида. Вызванные акустическими волнами колебания жгутика «антенны» передаются сенсиллам джонстонова органа, а затем преобразуются в электрические потенциалы [1–5].

Таким образом, установлено, что акустическая связь у насекомых базируется на высокочувствительных виброрецепторах, компенсируя полное отсутствие специализированных звуковых аппаратов. Этого вполне достаточно для пространственной ориентации насекомых в соответствии с биологической ситуацией. Благодаря естественному отбору повышалась надежность функционирования и чувствительность виброрецепторов, так как этим достигалась лучшая защита от врагов, приближение которых во многих биологических ситуациях порождает усиление колебаний твердой опоры.

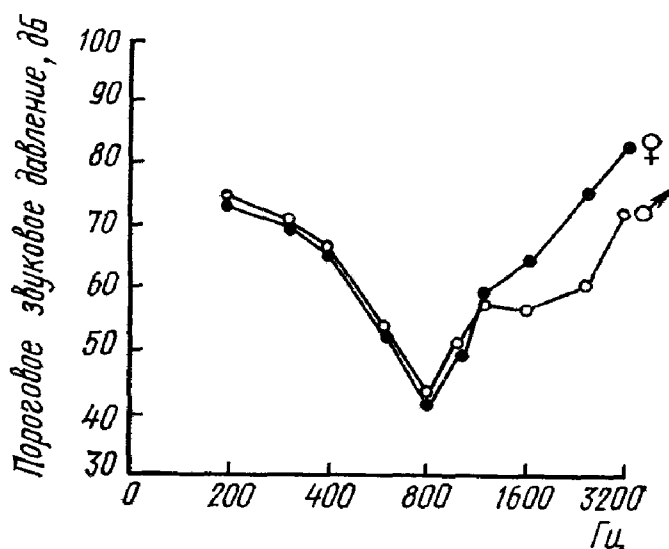


Рис. 3. Частотно-пороговые характеристики тимпанальных органов самца и самки цикады *Cystosoma saundersii* [5, 7, 9]

Несмотря на большое разнообразие конкретных проявлений акустического поведения, насекомые чаще всего используют слуховые анализаторы для решения двух основных задач: опознавания пространственно ориентированных или биологически важных сигналов и локализации источника звука. Результаты анализа этих звуков у некоторых видов насекомых свидетельствуют о том, что вибрационные раздражения регистрируются подколennыми органами некоторых насекомых в диапазоне частот от 25 Гц до 6 кГц, а максимальная чувствительность наблюдается при 1,4 кГц. Доказана возможность восприятия низкочастотных звуков трихонидными сенсиллами, расположенными на церках у тараканов и прямокрылых. У гусениц капустной совки *Varathra brassicae* звуковые раздражения в диапазоне частот от 20 Гц до 1 кГц вызывают резонансные колебания волосков трихонидных сенсилл и запускают рефлекторную реакцию бегства. У самцов и самок австралийской цикады *Cystosoma saundersii* максимальная чувствительность тимпанальных органов проявляется при 800 Гц, что соответствует положению максимума в призывных песнях самца (рис. 3). Тимпанальные органы совок отвечают на звуки в диапазоне частот от 3 до 150 кГц, но их максимальная чувствительность проявляется при восприятии ультразвуков частотой от 15 до 60 кГц.

Сложилось мнение, что для двукрылых, к которым относятся комары, частота, по-видимому, служит единственным критерием, по которому они могут различать звуки,

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

возникающие в полете, и это можно использовать в качестве критерия для определения одного из параметров БКС, но нужны дополнительные исследования.

Для изучения акустического сигнала, воспринимаемого комарами, были проанализированы технологии, которые используются в ловушках, предлагаемых на современном рынке [5], разработано и сконструировано устройство для привлечения комаров на основе комплексного воздействия на их рецепторные системы [7]. С помощью сконструированного устройства проведен эксперимент в течение июня 2011 года, методика которого приведена в [9].

Анализ спектров акустических сигналов, издаваемых комаром, полученные на основании обработки большого числа экспериментов, показал, что наиболее громкие звуки, издаваемые комаром, лежат в области 0,5 и 2,8 кГц [2–9]. Чтобы между самками и самцами комаров происходило акустическое взаимодействие, для подстройки частоты взмахов каждая особь должна обладать физиологическим механизмом (у человека это мозг) сравнения сигналов (один из сигналов внешний, а второй – собственный моторный ритм). Однако такой механизм до сих пор известен не был. Кроме того, данный процесс может происходить на фоне восприятия сигналов других самцов, особенно при их близком пролете относительно воспринимающего звук насекомого.

Для ответа на возникшие вопросы были проанализированы полученные результаты и работы [1–3].

Результатом анализа являются следующие утверждения.

1. Между самками и самцами комаров не происходит акустическое взаимодействие для подстройки частоты взмахов, так как для такого процесса необходимо время не только для подстройки частоты взмахов, но и для анализа поступающего акустического сигнала, причем время около сотых долей *мс*, и если бы комар анализировал каждый поступивший сигнал (включая ветер, шелест листьев деревьев, раскаты грома и т.д.), то он полностью был бы дезориентирован в пространстве.

2. Природа создала комаров таким образом, что они реагируют на биение крыльев. Точное согласование частот собственных взмахов и внешнего сигнала невозможно, так как при этом частота биений будет стремиться к нулю. Даже если рецепторный аппарат комара способен воспринимать колебания с частотой в несколько герц, время последующего анализа станет недопустимо большим (пропорционально периоду биений). Поэтому в реальности согласование скорее всего осуществляется с некоторой расстройкой по частоте, при которой еще возможно эффективное восприятие и анализ сенсорной системой низкочастотных биений.

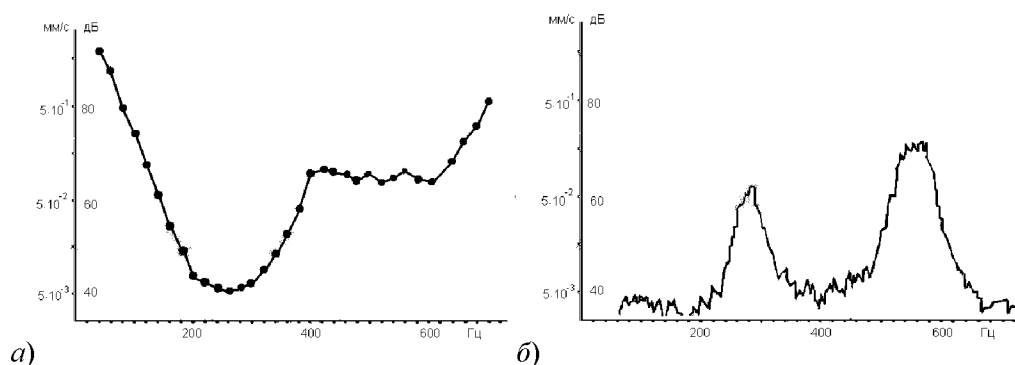


Рис. 4. а) усредненные частотно-пороговые характеристики джонстонова органа самцов *C. plumosus*, измеренные в условиях имитации полета и спектр звукоизлучения самки того же вида.

По горизонтальной оси – частота, Гц; по вертикальной оси – физиологические пороги, дБ [2, 9]

Были проанализированы результаты измерения снятия спектров звукоизлучения самок комаров; наложены усредненные частотно-пороговые характеристики, полученные в

условиях имитации полета и в статичной системе. Анализ показал, что все предыдущие предположения о конструкции ловушек, «приманивателей» и т.д. строились исходя из того, что пик излучения самок приходится на частоту порядка 600 Гц. Однако, как показывают проведенные опыты, максимальная чувствительность джонстонова органа лежит в области порядка 250 Гц, а сам чувствительный орган реагирует на рассогласование частот. Вследствие анализа полученных экспериментальных данных необходимо пересмотреть конструкции существующих устройств. Логичным представляется использовать в их конструкции генератора качающей частоты, которая позволит более эффективно или приманивать или «сбивать» с толку комариную популяцию.

Принцип работы данного устройства будет основываться на том, что среднее время, необходимое комару для ориентации в пространстве,  $\tau = 1/\nu$ , где  $\nu = 250$  Гц. Таким образом, время изменения частоты от 100 до 300 Гц в генераторе качающей частоты должно происходить за указанное время, что не позволит комарам ориентироваться в пространстве.

Для построения модели управления поведением комара в составе биокрибернетической системы опираемся на то, что акустический сигнал можно представить в виде интеграла Фурье [3]:

$$p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(f) \cos(2\pi ft + \varphi) df, \quad (1)$$

где  $a(f)$  – амплитудно-частотный спектр.

Акустические сигналы воспринимаются насекомыми на фоне помех, так называемого акустического фона естественного и искусственного происхождения, которые можно обозначить как внешний сигнал  $\nu_c$ . Собственные шумы атмосферы создаются такими источниками звукового поля, как, например, ветер, шелест листьев деревьев, раскаты грома и т.д. Поскольку многие насекомые (в том числе комары) воспринимают информацию, содержащуюся в акустическом сигнале, в полете, то нельзя не учитывать воздействия, которое оказывает тело летящего насекомого и акустические волны, исходящие от его крыльев. Таким образом, необходимо учитывать значения частот воспринимаемого сигнала  $\nu_b$  и внешнего сигнала  $\nu_c$ .

В настоящее время разрабатывается математическая модель управления комаром, которая позволит учитывать влияние внешнего шума и шума, производимого крыльями насекомого.

#### Список литературы

1. Жантеев Р. Д. Морфофункциональная организация антенн и джонстоновых органов комаров-звонцов (Diptera, Chironomidae) / Р. Д. Жантеев, М. В. Федорова, В. С. Чуканов, Н. Г. Есипович // Сенсорные системы. – 2000. – Т. 15.
2. Лапшин Д. Н. Восприятие акустических сигналов самцами комаров в условиях имитации полета / Д. Н. Лапшин // Сенсорные системы. – 2010. – Т. 24, № 2. – С. 141–150.
3. Лапшин Д. Н. Частотные характеристики слуховых интернейронов самцов комаров *Culex ripiens ripiens* L. (Diptera, Culicidae) / Д. Н. Лапшин // ДАН. – 2011. – Т. 439, № 2. – С. 279–282.
4. Лихтер А. М. Оптимальное проектирование оптико-электронных систем : монография / А. М. Лихтер. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2004. – 241 с.
5. Лихтер А. М. Разработка ловушки для привлечения комаров на основе комплексного воздействия на их рецепторные системы / А. М. Лихтер, А. Ф. Махмудова // Человек и животные : мат-лы V Междунар. науч.-практ. конф. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2010. – С. 79–83.
6. Лихтер А. М. К вопросу о передаче акустической информации насекомыми в экосистеме / А. М. Лихтер, А. Ф. Махмудова, В. В. Смирнов // Экокультура и фитобиотехнологии улучшения качества жизни на Каспии : мат-лы Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи (7–10 декабря 2010 г.). – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2010. – С. 68–72.

---

---

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

---

7. Лихтер А. М. Физические основы расчета параметров устройства для привлечения комаров на основе комплексного воздействия на их рецепторные системы / А. М. Лихтер, А. Ф. Махмудова // Мир физики и компьютерные технологии : сб. тр. Северо-Кавказской научной школы-семинара (8–10 декабря 2010 г.). – Карачаевск : Изд-во КГЧУ, 2010. – С. 66–71.

8. Лихтер А. М. Некоторые аспекты эффективности акустических систем управления поведением насекомых / А. М. Лихтер, А. Ф. Махмудова, В. В. Смирнов, И. Ф. Сызранова // Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования : мат-лы IX Междунар. науч.-практ. конф. (28 февраля 2011 г.). – Тамбов : Изд-во ТГУ, 2011. – С. 48–52.

9. Махмудова А. Ф. К вопросу об эффективности акустических систем управления поведением насекомых / А. Ф. Махмудова, А. М. Лихтер // Школа научно-технического творчества и концептуального проектирования : мат-лы Междунар. науч. школы для молодежи. Исследование молодых ученых – вклад в инновационное развитие России : мат-лы Регион. науч.-практ. конф. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2011. – Т. 1: Машиностроение, электроника, приборостроение. Информационные технологии (10–14 октября 2011 г.). – С. 190–193.

### References

1. Zhantiev R. D. Morfofunkcional'naja organizacija antenn i dzhonstonovykh organov komarov-zvoncov (Diptera, Chironomidae) / R. D. Zhantiev, M. V. Fedorova, B. C. Chukanov, N. G. Ecipovich // *Sensornye sistemy*. – 2000. – Т. 15.

2. Lapshin D. N. Vospriyatие akusticheskikh signalov samcami komarov v usloviyah imitacii poleta / D. N. Lapshin // *Sensornye sistemy*. – 2010. – Т. 24, № 2. – С. 141–150.

3. Lapshin D. N. Chastotnye karakteristiki sluhovykh internejronov samcov komarov *Culex pipiens* L. (Diptera, Culicidae) / D. N. Lapshin // *DAN*. – 2011. – Т. 439, № 2. – С. 279–282.

4. Lihter A. M. Optimal'noe proektirovanie optiko-jelektronnykh sistem : monografija / A. M. Lihter. – Astrahan' : Izd. dom «Astrahanskij universitet», 2004. – 241 s.

5. Lihter A. M. Razrabotka lovushki dlja privlechenija komarov na osnove kompleksnogo vozdeystvija na ih receptornye sistemy / A. M. Lihter, A. F. Mahmudova // *Chelovek i zhivotnye : mat-ly V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* – Astrahan' : Izd. dom «Astrahanskij universitet», 2010. – С. 79–83.

6. Lihter A. M. K voprosu o peredache akusticheskoi informacii nasekomymi v jekosisteme / A. M. Lihter, A. F. Mahmudova, V. V. Smirnov // *Jekokul'tura i fitobiotehnologii uluchshenija kachestva zhizni na Kaspии : mat-ly Mezhdunar. konf. s jelementami nauchnoj shkoly dlja molodezhi (7–10 dekabrja 2010 g.)*. – Astrahan' : Izd. dom «Astrahanskij universitet», 2010. – С. 68–72.

7. Lihter A. M. Fizicheskie osnovy rascheta parametrov ustrojstva dlja privlechenija komarov na osnove kompleksnogo vozdeystvija na ih receptornye sistemy / A. M. Lihter, A. F. Mahmudova // *Mir fiziki i komp'juternye tehnologii : sb. tr. Severo-Kavkazskoj nauchnoj shkoly-seminara (8–10 dekabrja 2010 g.)*. – Karachaevsk : Izd-vo KGChU, 2010. – С. 66–71.

8. Lihter A. M. Nekotorye aspekty jeffektivnosti akusticheskikh sistem upravlenija povedeniem nasekomykh / A. M. Lihter, A. F. Mahmudova, V. V. Smirnov, I. F. Syzranova // *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sisteme obrazovaniya : mat-ly IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (28 fevralja 2011 g.). – Tambov : Izd-vo TGU, 2011. – С. 48–52.

9. Mahmudova A. F. K voprosu ob jeffektivnosti akusticheskikh sistem upravlenija povedeniem nasekomykh / A. F. Mahmudova, A. M. Lihter // *Shkola nauchno-tehnicheskogo tvorchestva i konceptual'nogo proektirovaniya : mat-ly Mezhdunar. nauch. shkoly dlja molodezhi. Issledovanie molodykh uchenykh – vklad v innovacionnoe razvitie Rossii : mat-ly Region. nauch.-prakt. konf.* – Astrahan' : Izd. dom «Astrahanskij universitet», 2011. – Т. 1: Mashinostroenie, jelektronika, priborostroenie. Informacionnye tehnologii (10–14 oktjabrja 2011 g.). – С. 190–193.