

РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КУБЫШЕК САРАНЧИ В МЕСТАХ ИХ ЗАЛЕГАНИЯ

А. А. Калинин¹, Б. Г. Кутуза¹, В. М. Масюк¹, К. А. Вытовтов², Е. А. Барабанова²,
М. Ф. Булатов³, М. И. Гапонов³, В. Н. Куренков⁴, Е. С. Бродский⁵

¹ Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11. корп. 7

² Астраханский государственный технический университет,
414056, Астрахань, ул. Татищева, д.16

³ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
117342, Москва, ул. Бутлерова, 15

⁴ ОАО Концерн радиостроения "Вега" 121170, Москва, Кутузовский проспект, 34

⁵ Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
119071, Москва, Ленинский проспект, д.34

Статья поступила в редакцию 28 августа 2018 г.

Аннотация. Саранча является особенно опасным вредителем сельскохозяйственных культур, учитывая рождаемость, скорость передвижения, а также полное уничтожение зеленых растений по маршруту перемещения. Для борьбы с саранчой проводятся агротехнические и химические мероприятия, которые в ряде случаев связаны с отрицательными последствиями. Для успешной борьбы с саранчовыми прежде всего необходимо иметь достоверную информацию о местах яйцекладки. Такую информацию призвано давать обследование по кубышкам, но именно оно, как показывает практика, является наиболее трудоёмким и мало информативными. Поэтому задача разработки дистанционных методов обнаружения кубышек саранчи является актуальной.

Ключевые слова: саранча, методы борьбы, методы обнаружения участков с кубышками саранчи, радиолокационные и радиометрические определения залегания кубышек, феромоны, масс-хроматографические методы.

Abstract. Locusts are an especially dangerous pest of crops, given the birth rate, speed of movement, as well as the complete destruction of green plants along the migration route. To combat the locust, agricultural and chemical measures are carried

out, which in some cases are associated with negative consequences. In order to successfully combat locusts, it is necessary first of all to have reliable information about the sites of oviposition. Such information is called upon to be given a survey on egg capsules location, but it is, as practice shows, the most time consuming and informative. Therefore, the task of developing remote methods of detection of location of locust egg capsules is urgent.

Key words: locusts, methods of control, detection methods for locust egg capsules location, radar and radiometric determinations of egg capsules location, pheromones, mass chromatography methods.

Введение

Из всех вредителей растений самым опасным для южных регионов России является саранча. Вред наносится не только зерновым культурам, но и пропашным, овощным, садовым и прочим. Рассадниками саранчи являются, как правило, залежные земли, посевы многолетних трав, сенокосы, пастбища, прибрежные полосы любых водоемов.

Семейство настоящих саранчовых (Acrididae) включает до 10000 видов, из которых около 400 распространены в европейско-азиатском ареале, в том числе в РФ (Средняя Азия, Казахстан, юг Западной Сибири, Кавказ, юг Европейской части). Саранча в период массового размножения способна одновременно занять до 2000 га. Перед наступлением холодов самка откладывает яйца, формируя в верхнем 10 см слое почвы «зимние квартиры», так называемые кубышки, внутри которых она размещает по 50-100 яиц. Количество кубышек, отложенных стадной саранчой, может достигать до 2000 на один квадратный метр. Во время зимней паузы яйца приобретают холодоустойчивость и не вымерзают даже в сильные зимы. С наступлением тепла зимняя пауза заканчивается и весной при достаточном прогревании почвы в верхнем слое из яйца появляется белая личинка.

В качестве борьбы с саранчой используются несколько методов:

1) Механическая борьба (агротехнические мероприятия) состоит в «перепаживании» земли осенью в районах, подверженных появления саранчи.

При поздней перекопке участка разрушаются кубышки с яйцами саранчи. Часть личинок саранчи оказываются на поверхности земли и в зимний период замерзают. Другая часть оказывается глубоко под землей и не может «выкопаться». Отдача от распашки, которую иногда представляют в качестве универсального метода борьбы с саранчовыми, далеко не всегда оказывается пропорциональной затратам на неё. Более того, при определённых условиях распашка может привести не к улучшению, а к ухудшению саранчовой ситуации. Кроме того, такой вид борьбы связан с возможными отрицательными последствиями, например, регулярная вспашка может привести к почвенной эрозии и резкому снижению плодородия земель.

2) Основным способом уничтожения саранчовых в периоды их массовых размножений и по пути следования стаи саранчи являются химические меры борьбы, особенно на больших площадях. Химические меры борьбы (распыление различных ядохимикатов), зачастую являются экологически вредными мероприятиями. Такой вид обработки недопустим в водоохраных зонах, вблизи населенных пунктов, а также на территориях санаториев, баз отдыха, заказников, заповедников и т.д., ввиду опасности сноса пестицидов.

Для успешной борьбы с саранчовыми в первую очередь необходимо иметь достоверную информацию о местах яйцекладки. В настоящее время для учета численности саранчовых на 1 квадратный метр проводят обследование мест залегания кубышек в период с начала сентября и до середины октября. Обследование проводят «с лопатой в руках» (см. рис.1).

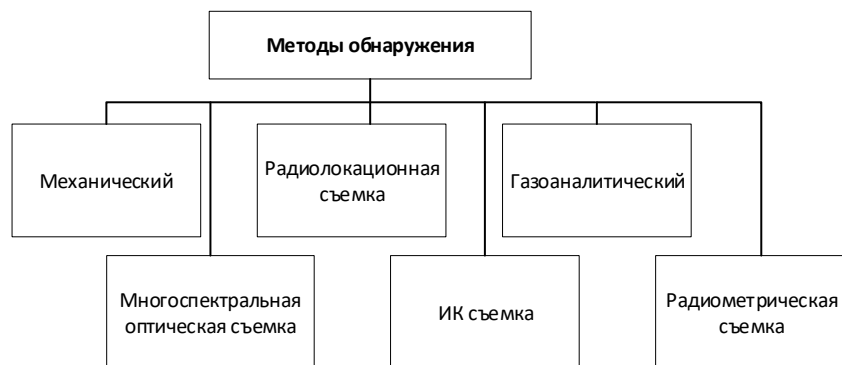


Рис.1. Пример обследования мест залегания кубышек.

Через каждые 100 метров срезают лопатой верхний слой почвы площадью 50x50 см и на глубину 5-8 см. Выявленные залежи кубышек отмечают на картах местности. Данный метод является малопродуктивным, так как не позволяет обнаружить с достаточной точностью все места залегания кубышек и, как показывает практика, является наиболее трудоёмким и малоинформативным. Поэтому задача разработки дистанционных методов обнаружения кубышек саранчи является актуальной.

1. Методы обнаружения мест залегания кубышек саранчи

Под дистанционными методами оконтуриванием мест залегания кубышек саранчи подразумеваются методы, при которых не нарушается покров поверхности. При этом возможны принципы по обнаружению кубышек как на первичной основе, так и по косвенным (вторичным) признакам (см. таблицу 1). В качестве демаскирующих признаков мест залегания кубышек выступают контрасты между подстилающими поверхностями при отсутствии и наличии кубышек. Контрасты могут быть обусловлены изменением шероховатости поверхности и травяного покрова при откладывании яиц самкой саранчи в верхний слой почвы, а также изменением среднего значения диэлектрической проницаемости в местах расположения кубышек, а также наличием специфичных запахов (феромонов) в местах яйцекладов. В результате использование дистанционных методов для оконтуривания мест залегания кубышек основывается на а) изменении входных параметров приемных устройств (в частности на импеданс входной антенны); б) отличии теплофизических характеристик в ИК диапазоне (тепловизоры) и радиояркостной температуры в СВЧ диапазоне (СВЧ радиометры); в) отличии многоспектральных оптических характеристик, г) отличии отражательных характеристик в радиодиапазоне (радиолокация); д) наличии специфичных запахов (феромонов) в местах яйцекладов. Обнаружение мест залегания кубышек по пунктам в) и г) основываются на вторичных факторах.

Таблица 1. Основные методы поиска участком с кубышками саранчи

Анализируя возможные методы обнаружения мест расположения кубышек, можно отметить, что ситуация осложняется тем, что решать задачи поиска кубышек саранчи приходится в различных условиях (погодно-климатических, ландшафтно-территориальных, влажностных для различных почв, покрытых травяной растительностью).

Работа является постановочной, проблемной и была сформирована по инициативе Астраханского государственного технического университета в 2017 году для рассмотрения наиболее перспективных направлений дистанционных методов для решения указанной проблемы и, в основном, касалась проведением лабораторных исследований. Для ее выполнения были привлечены ряд научных и инженерных организаций.

2. Измерение диэлектрической проницаемости почвы в районе расположения кубышки

За основу был взят опыт измерения влажности «живой» древесины [1]. В экспериментах определялось влияние комплексной диэлектрической проницаемости окружающей среды на КСВ штыревой антенны. Выполнения измерений проводились в лабораторных условиях в кюветах (см. рис. 2) с помощью измерительной линии. Предварительно были выполнены калибровочные измерения рис.3-4 с помощью использования диэлектрических свойств растворов с известными диэлектрическими свойствами в диапазоне длин волн 12 см.

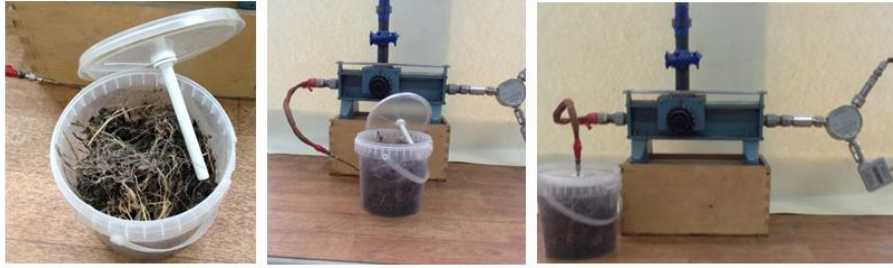


Рис. 2. Измерение диэлектрической проницаемости почвы и растворов

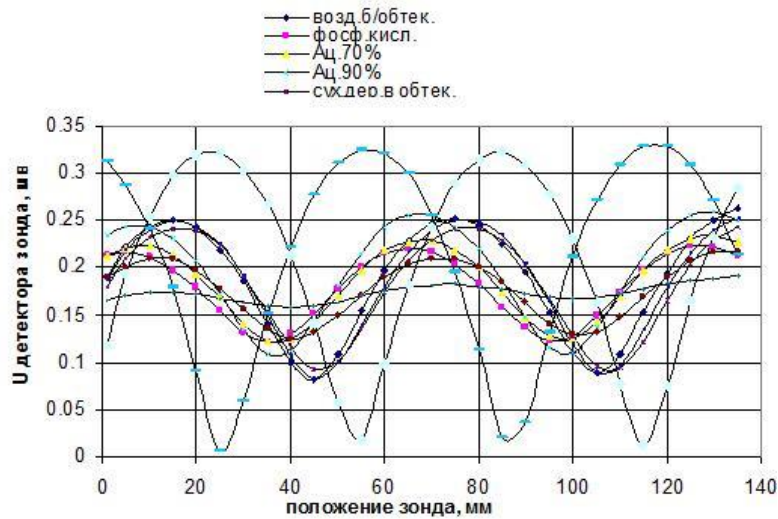


Рис. 3. Калибровочные измерения КСВ дипольной антенны

Модель, описывающая экспериментальные данные, представлялась уравнением:

$$y = a_0 + a_1 + x + a_2 \sin(\omega x + \varphi) ,$$

Где a_0 - постоянная составляющая, a_1 – коэффициент, в большей степени обусловленный наличием методической погрешности, ω - частота, φ - фаза сигнала, a_2 - амплитуда сигнала. Параметры модели $a_0, a_1, a_2, \omega, \varphi$ определяются стандартным методом - методом наименьших квадратов. Значения диэлектрической проницаемости ε' и ε'' неявно зависят от параметров $\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$, φ и могут быть заданы таблично для разных калибровочных материалов. Модель для ε' и ε'' представляется в виде:

$$\varepsilon' = f_1 \left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi \right) , \quad \varepsilon'' = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 y^2 ,$$

$$\varepsilon'' = f_2\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right), \quad \varepsilon'' = c_0 + c_1x + c_2y + c_3x^2 + c_4y^2,$$

где $x = \frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$ и $y = \varphi$.

Коэффициенты b_i и c_i находятся по решению задачи аппроксимации на неравномерной сетке также методом наименьших квадратов. Результаты аппроксимации представлены на рис.4.

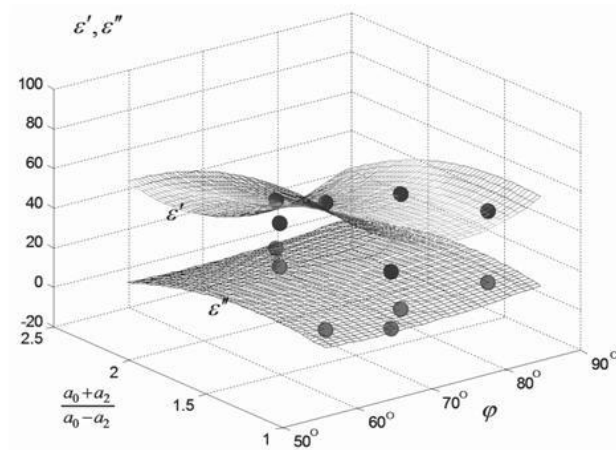


Рис.4 Модель зависимости $\varepsilon' = f_1\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$ и $\varepsilon'' = f_2\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$.

Анализ результатов показал, что точность модели аппроксимации на этапе нахождения $\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$ и φ не хуже 3÷4%, однако точность аппроксимации

$\varepsilon' = f_1\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$ и $\varepsilon'' = f_2\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$ низка, по нашим оценкам порядка 30÷40%. Точность аппроксимации должна повышаться с увеличением числа калибровочных сред с известными значениями ε' и ε'' в диапазоне $\lambda = 12$ см.

В дальнейшем в данную кювету помещались образцы почвы с кубышками саранчи и в случае ее отсутствия. Следует отметить, что после встряхивания кюветы с почвами результаты определения мнимой и действительной части диэлектрической проницаемости менялись (данные

результаты измерений объяснимы – «пестрота» грунта, а также расположения кубышек внутри кюветы после встряхивания меняются). В результате измерений диэлектрической проницаемости образцов почвы, представленных сотрудниками Астраханского государственного технического университета, были получены следующие результаты.

$$\varepsilon^* = (6,2 \pm 2,5) + i(4,1 \pm 1,5) \text{ для грунта без кубышек и личинок;}$$

$$\varepsilon^* = (14,3 \pm 4,5) + i(8,4 \pm 3,5) \text{ для грунта с кубышками и личинками.}$$

Измерить влажность грунта не удалось: при $T > 100^\circ\text{C}$ начинает выгорать органика почвы.

Значительное изменения как действительной, так и мнимой частей диэлектрической проницаемости дает надежду, что с помощью данного метода можно попытаться построить устройство для обнаружения мест залегания кубышек саранчи. При этом необходимо от штыревой антенны перейти к планарной (плоской) или рупорной антенны, использовать просто влияние грунта на амплитуду (мощность) отраженной волны, или посредством измерения диэлектрической проницаемости с помощью много зондовой измерительной линии.

Опыт предыдущих исследований показывает, что основная трудность в интерпретации данных будет заключаться в флуктуации измеряемых данных из-за изменений согласование антенны с поверхностью: а) из-за шероховатости, б) из-за большой «пестроты» растительного, почвенного, влажностного покрова и особенно самого верхнего слоя почвы, где расположена корневая система.

3. Оценка возможности радиометрических методов

Переход к широкополосным радиометрическим и радиолокационным системам может несколько уменьшить влияние шероховатости и «пестроты» поверхностного слоя. С этой целью в лабораторных условиях была предпринята попытка использовать широкополосную радиометрическую систему. Был использован макет модуляционного радиометра Рад75, разработанного в СКБ ФИРЭ (см. рис. 5 а, б). Основные характеристики

радиометра: центральная частота 7,5 ГГц ($\lambda = 4\text{см}$), $\Delta F = 1,8\text{ГГц}$,
чувствительность $\Delta T^0 < 0,01^0\text{К}$ при $\tau = 1\text{сек}$.

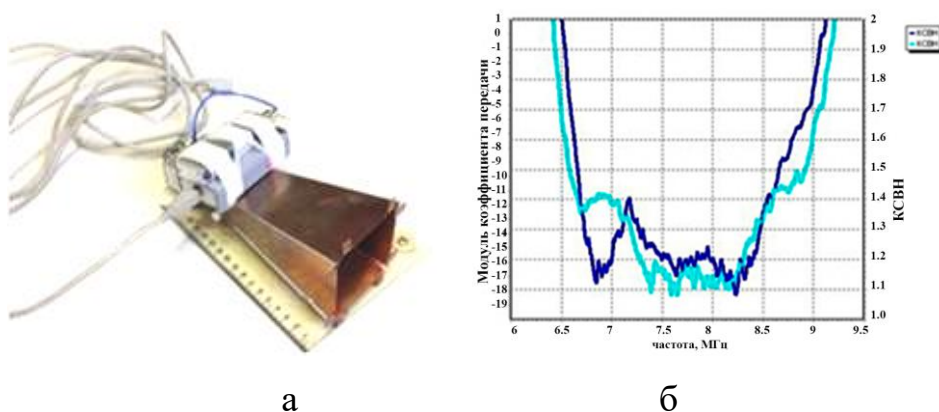


Рис. 5. Радиометрические исследования: а – внешний вид радиометра;
б – частотная характеристика для двух режимов.

Измерение радиотеплового контраста контейнеров почвы при наличии и отсутствии кубышек осуществлялось как на фоне земли, так и на фоне атмосферы рис. 6.

Измерения показали, что контраст составил около 6^0К и слабо зависел от расположения контейнеров. Следует учитывать, что остатки растительного покрова на полученных образцах, также как сама почва были сухими (весовая влажность почвы была порядка 5%).

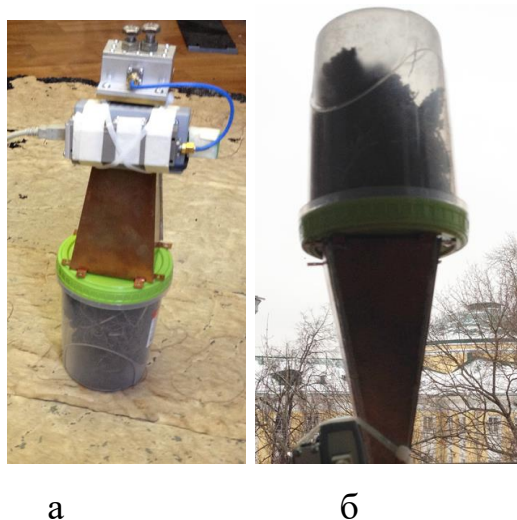


Рис. 6. Использование радиометра 4см диапазона для обнаружения кубышек в лабораторных условиях:
а) на фоне черного тела; б) на фоне атмосферы.

Отметим, что первые полученные результаты являются очень благоприятным для обнаружения кубышек. Однако в естественных условиях при наличии растительного покрова и большой влажности почвы, а также больших перепадов их значений (связанных с естественной «пестротой» почвы и растительного покрова), см. рис.7,8 надежность выводов может оказаться не достаточной. И этот факт предполагает необходимость проведения дальнейших измерений и всестороннего анализа полученных результатов.

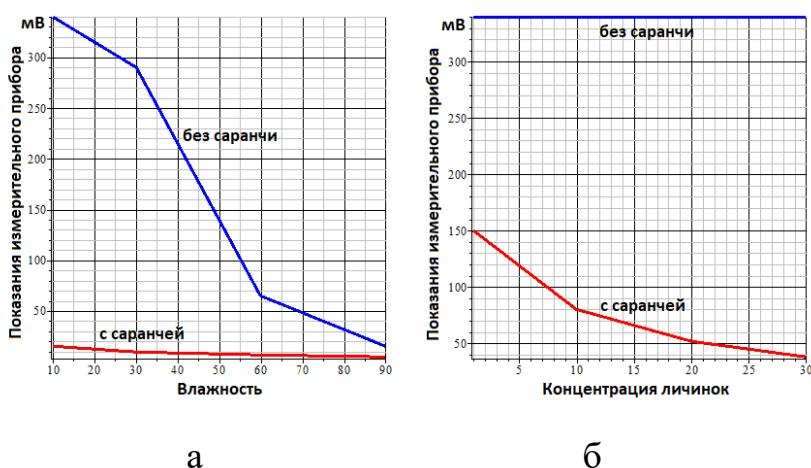


Рис. 7. Зависимость влияния весовой влажности и концентрации личинок на КСВ измерительной антенны:

- (а) от влажности почвы при концентрации личинок 10%;
- (б) от концентрации личинок при влажности 60% .

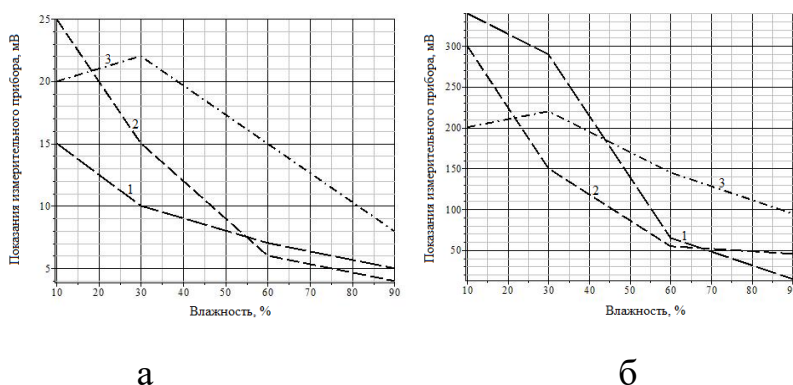


Рис. 8. Зависимость влияния весовой влажности на КСВ измерительной антенны:

- (а) от влажности почвы с саранчой;
- (б) от влажности почвы без саранчи.

4. Оценка возможности определения мест яйцекладок саранчи по наличию специфических запахов (феромонов)

Феромоны – химические вещества, выделяемые во внешнюю среду одними организмами и вызывающие у воспринимающих их других организмов специфические реакции [2]. Феромоны насекомых разнообразны: половые, феромоны тревоги и т.д. и могут меняться на разных стадиях развития насекомых. Следует отметить, что аналогично во внешнюю среду выделяют и взрывчатые вещества. В результате разрабатываются электронные приборы, которые называются «электронный нос», для обнаружения мин. Принцип работы этих устройств заключается в следующем: в аппаратуру втягивается воздух над исследуемым объектом, в дальнейшем он ионизируется и по скорости движения положительных и отрицательных ионов определяется наличие и тип взрывчатых веществ. В виду того, что для овец личинки саранчи представляют лакомство, было сделано предположение, что личинки саранчи также выделяют какие-то феромоны. Эти феромоны могут представлять признак определения мест яйцекладок саранчи, т.е. на них может основываться успех применения «электронного носа». Для выяснения возможности использования электронных приборов *Институтом проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН* была оказана научно-техническая помощь.

Анализировались образцы личинок саранчи и почвы, из которой были выбраны личинки. Анализ проводился хроматомасс-спектрометрическим методом. Пробу в количестве 1 г помещали в стеклянную емкость объемом 150 мл, закрытую завинчивающейся крышкой с резиновой мембраной, вводился сорбционный стержень и выдерживали в течении 30 минут при температуре 30⁰С. Сорбционный стержень затем вводили в хромато-масс-спектрометрическую систему (особенности аппаратуры и методика проведения исследования опускается). На хроматограмме личинок имеется большой набор пиков, соответствующих ароматическим углеводородам: толуол, ксилолы, триметилбензолы, нафталин и др. Имеется несколько пиков алканов, а также перхлорэтилен. Эти вещества, по-видимому, следует признать «памятью»

сорбционного стержня. Единственный пик, который, вероятно, не является «памятью» это терпеноид лимонен или его изомер. На масс-хроматограмме образца почвы пики ароматических углеводов отсутствуют, присутствует пик терпеноида с $RT= 14,69$ мин, аналогичный наблюдавшемуся на хроматограмме личинок, еще один пик терпеноида с $RT= 14,16$ мин. На масс-хроматограмме образца почвы пики ароматических углеводов отсутствуют, присутствует пик терпеноида с $RT= 14,69$ мин, аналогичный наблюдавшемуся на хроматограмме личинок, еще один пик терпеноида с $RT= 14,16$ мин.(см. рис.9, 10)

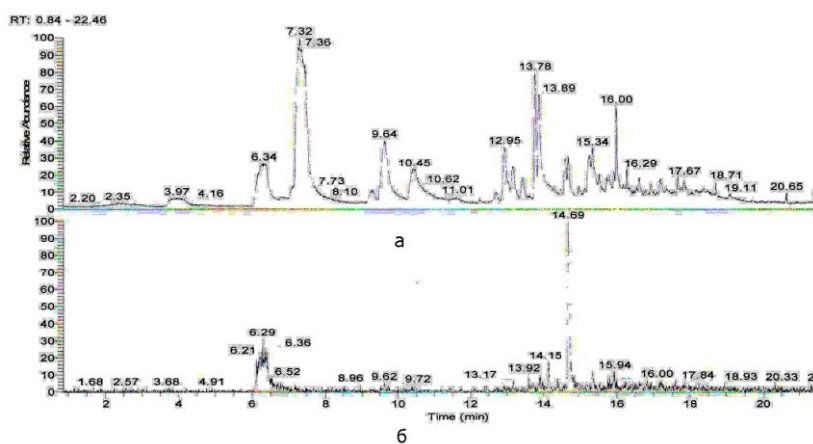


Рис. 9. Масс-хроматограммы личинок

а) по полному току, б) по характерному току m/z 93

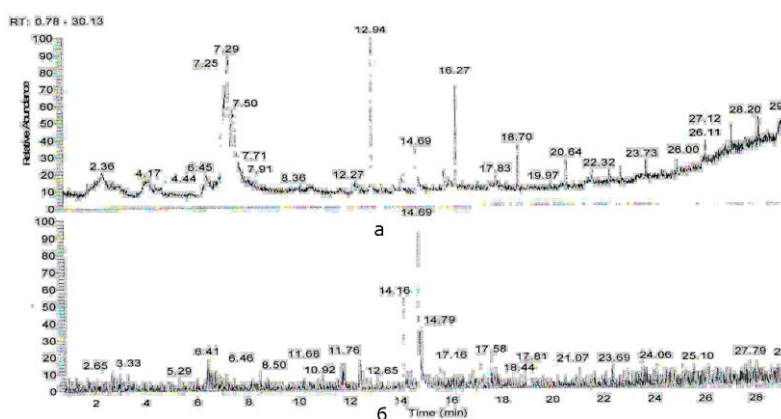


Рис. 10. Масс-хроматограммы почвы

а) по полному току, б) по характерному току m/z 93

Таким образом, в предварительных лабораторных исследованиях соединений, которые можно было бы предположительно считать феромонами личинок, достоверно не обнаружено. Чувствительность ориентировочно составляет несколько мкг/г органического вещества. Однако, для окончательных выводов по данному вопросу требуются дополнительные многочисленные полевые и лабораторные исследования.

5. Многоспектральный оптический метод

Многоспектральная съемка Земной поверхности со спутников, самолетов, беспилотных летательных аппаратов широко применяется для исследования растительных покровов, водных поверхностей для многообразных целей, для разработки методов обнаружения мин и т.д.

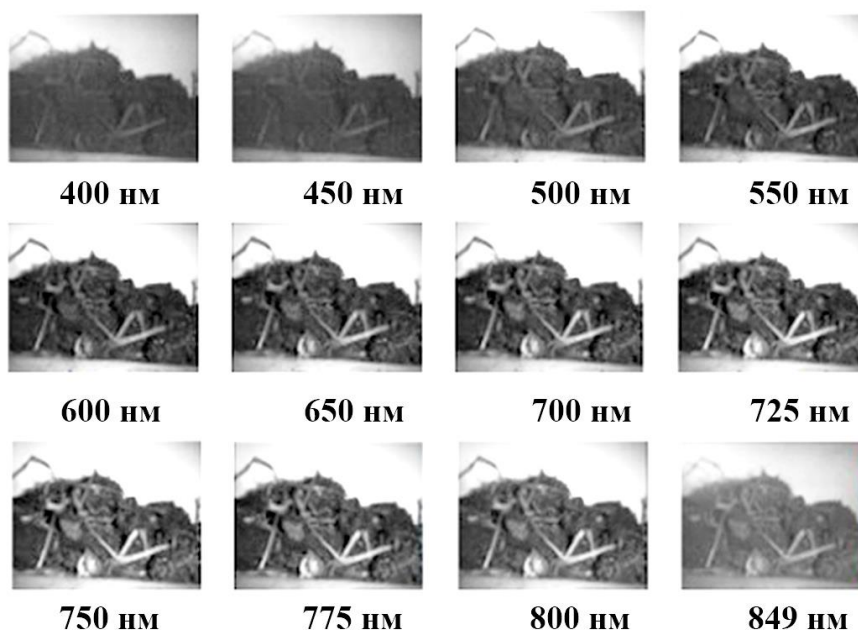


Рис. 11. Спектральной изображения с частично разбитой кубышкой в диапазоне 450 – 850 нанометр.

Предварительные измерения показали, что спектры личинок саранчи и почвы различаются в диапазоне 750-800 нанометр. При этом обнаружение наличия кубышек саранчи возможно только по косвенным признакам, а именно, по изменению поверхности растительного и почвенного покровам. Таким образом, для дальнейших исследований требуются многоспектральные

изображения выбранного в Астраханской области участка поверхности в период с сентября по октябрь с последующим их тщательным анализом.

6. Рассмотрение использования РЛИ для обнаружения мест яйцекладок саранчи

Существуют методы мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий, основанные на использовании радиолокационных снимков земной поверхности, соответствующих различным диапазонам частот и различным режимам поляризации, и наблюдении динамики изменения диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности за время между несколькими съемками (технология «Change Detection»).

Эти методы широко распространены для прогноза урожайности, оценки состояния сельскохозяйственных угодий, влажности почвы и др.

В 2019-2021 годах планируется запуск двух радиолокационных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли из космоса S-диапазона длин волн «Кондор-ФКА», заказчиком которых является Роскосмос, который в 2016 года заявлял, что данные будут доступны широкому кругу заинтересованных сторон.

В настоящее время на орбите функционируют более 10 коммерческих радиолокаторов различных диапазонов длин волн, такие, как:

Sentinel-1. На борту изделия “Sentinel 1” установлена РЛС с синтезированной апертурой/C-SAR. Съемка выполняется в C-диапазоне, длина волны ($\lambda = 5,6$ см.), пространственное разрешение достигнет 5x5 м. Снимки с Sentinel-1 с разрешением 10x10 м свободно доступны в сети Интернет;

Alos-2. В состав аппарата входит SAR в L диапазоне с частотным диапазоном в размере 1.2 ГГц, имеет разрешения 1-3 метра и 3-10 метров в зависимости от режима работ;

COSMO-SKYMED это созвездие из четырех спутников, радаром с синтезированной апертурой и проводящих съемку в X-диапазоне;

Terrasar-X. Спутник TerraSAR-X, разработанный Немецким аэрокосмическим центром (DLR) и компанией EADS Astrium GmbH, был запущен 15 июня 2007 г. и выведен на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 514 км с наклоном 97,44°. Спутник оснащен новейшим радаром с синтезированной апертурой, позволяющим выполнять радиолокационную съемку земной поверхности со сверхвысоким пространственным разрешением до 1 м, что делает спутниковую систему TerraSAR-X одним из наиболее совершенных инструментов дистанционного зондирования Земли. 21 июня 2010 г. произведён успешный вывод на орбиту второго спутника - TanDEM-X. Совместная работа двух спутников позволяет в полной мере использовать интерферометрические технологии и производить высокоточную интерферометрию с сантиметровой точностью, а также обеспечить глобальное покрытие земной поверхности высокоточной ЦМР с точностью по высоте менее 2 м.;

Radarsat-2. Канадский спутник запущен 14 декабря 2007, оснащен многофункциональным радаром с синтезированной апертурой, который позволяет получать изображения в С-диапазоне длин волн с разрешением до 3 метров.

Несмотря на то, что в принципе на коммерческой основе можно получить качественные, с пространственным разрешением $1 \times 1 \text{ м}^2$ (необходимой для решения поставленной задачи), исполнителям данной работы пришлось воспользоваться только результатами радиолокационной съемки с борта спутника Sentinel-1 с разрешением $10 \times 10 \text{ м}^2$.

Ниже приведен пример (Рис.12) радиолокационных изображений с Sentinel-1 Икрянинского района, Астраханской обл., сделанные в конце сентября – начале октября 2017 года. Предварительно можно сказать, что полученные РЛИ с учетом плохого наземного обеспечения мало подходят для решения поставленной проблемы по качеству.



в

Рис. 12. Изображения: а - радиолокационное изображение, б - фото из Google участка поверхности в Астраханской области, в - панорамная РЛИ.

Заключение

Представленные материалы являются первым важным шагом в решении актуальной проблемы мониторинга кубышек саранчи. Анализ возможных методов достоверного обнаружения мест залегания кубышек показал, что проблема поиска дистанционными средствами мест яйцекладки саранчовых потребует в будущем многочисленных глубоких исследований в данном направлении. Однако, основываясь на представленных первых результатах, мы можем предположить, что единого универсального средства решения данной проблемы на сегодняшний день не существует. Для решения поставленной задачи очевидно должен использоваться целый комплекс методов измерений и анализа. Также важно отметить, что в перспективных исследованиях поиска мест яйцекладки саранчовых необходимо учитывать и целый ряд объективных факторов: погодные-климатические и влажностные условия, разнообразие типов

почв, растительный покров, имеющий большую «пестроту» физико-химических свойств, а также шероховатости поверхности. Тем не менее, предварительные измерения, например, радиометрическими методами на местности, позволяют утверждать, что дистанционный мониторинг мест яйцекладки саранчовых является решаемой перспективной задачей.

Литература

1. А.А.Калинкевич, «Об измерении диэлектрической проницаемости живой древесины в целях микроволнового дистанционного зондирования Радиотехника и электроника, 2013, т.58, №9, 943-950

2. К.В.Лебедева, В.А. Миняйло, Ю.Б. Пятнова, «Феромоны насекомых», Изд. «Наука» Москва 1984, стр.268.

Для цитирования:

А. А. Калинкевич, Б. Г. Кутуза, В. М. Масюк, К. А. Вытовтов, Е. А. Барабанова, М. Ф. Булатов, М. И. Гапонов, В. Н. Куренков, Е. С. Бродский. Рассмотрение возможностей применения радиофизических дистанционных методов дистанционного зондирования для мониторинга кубышек саранчи в местах их залегания. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.9