

Приведенные модели хорошо описывают данные эксперимента и рекомендуются для практического использования.

Авторами были построены многофакторные модели для ряда факторов.

Уравнение регрессии для всей длины сопла:

$$S = 0.38 \cdot d^{1.69} \cdot M^{-0.38} \cdot P^{-0.41}$$

Где  $d$ -диаметр входного сечения (м),  $M$ -число Маха,  $P$ -давление (МПа).

Коэффициент множественной корреляции  $R=0.969$ . Критерий Фишера  $F=26$ .

Для сверхзвуковой части сопла  $d_{кр} = 0.282 \cdot d^{0.06} \cdot \pi^{0.09} \cdot l^{0.02}$

Где  $d_{кр}$ -критический диаметр сопла (м),  $l$ -длина сверхзвуковой части сопла,  $R=0.921$ .

©ВА РБ

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫХ ВЫСОТАХ ЗА ГОРИЗОНТОМ ЗЕМЛИ**

*А.Ю. ЛИПЛЯНИН, И.А. ИВАЩЕНКО*

At this work set out results [electromagnetic interaction](#) underlying surface Earth with aircraft, at nap-of-the-earth, as well as possibility use appear electromagnetic radiation for radiolocation low-flying mechanism [hull down](#) Earth

Ключевые слова: низколетящий летательный аппарат, радиолокация, обнаружение за горизонтом Земли, крылатая ракета, эквивалентный колебательный контур

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Итоги последних войн [1, 2] говорят о том, что в начале боевых действий противник стремится поразить комплексы противовоздушной обороны (ПВО) стационарного базирования. Мобильные комплексы, имеют преимущество по скрытности первоначального размещения, но и их положение может быть установлено радиоэлектронной разведкой противника. Поэтому важную роль приобретают нетрадиционные, неожиданные методы локации целей, в первую очередь тех, которые в силу естественных причин не могут быть обнаружены наземными средствами обнаружения ПВО [3]. К таким целям относятся низколетящие летательные аппараты (НЛА) за горизонтом Земли (ГЗ), в частности, крылатые ракеты (КР), активно используемые в последних войнах войсками НАТО.

Таким образом, актуальность задачи повышения эффективности ПВО от удара НЛА требует исследования и разработки возможных нетрадиционных методов локации НЛА [3], основанных, в частности, на использовании явлений, являющихся результатом взаимодействия летательного аппарата (ЛА) с окружающей средой – атмосферой и поверхностью Земли (ПЗ).

В [4] впервые предложен альтернативный метод обнаружения низколетящих целей за ГЗ радиолокационными средствами наземного базирования, основанный на электродинамической модели взаимодействия НЛА с ПЗ в виде эквивалентного колебательного контура (ЭКК). Переизлучение ЭКК падающих на него электромагнитных волн (ЭМВ) с частотами в полосе частот ЭКК, который, как показали исследования, лежит в области единиц мегагерц и ниже, обеспечивает возможность радиолокации НЛА. Волны указанных диапазонов способны распространяться за ГЗ за счет отражения от ионосферы и явления дифракции. Это создает предпосылки для использования этого излучения для локации НЛА за ГЗ. На основе модели ЭКК разработаны способы обнаружения [5] и определения характеристик и параметров движения НЛА: дальности [6], курсового угла [7], радиальной скорости [8].

Цель работы – определить границы применимости модели ЭКК, а также исследовать электромагнитное взаимодействие с поверхностью Земли ЛА, летящего на предельно малой высоте, и возможности использования возникающего при этом электромагнитного излучения (ЭМИ) для радиолокации НЛА за ГЗ.

### **2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЛА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ**

В основу исследований взаимодействия с поверхностью Земли ЛА, движущегося на предельно малой высоте, положена модель эквивалентной двухпроводной линии (ЭДЛ) [9, 10].

Модель ЭДЛ шире модели ЭКК. Она включает в себя перемещение по корпусу НЛА заряда, индуцированного неровностями ПЗ и искусственными и естественными источниками. В модели ЭДЛ электрические характеристики являются распределенными, влияние длины НЛА является более существенным, чем в модели ЭКК. Кроме того, электрический ток в двухпроводной линии существует и в отсутствии нескомпенсированного заряда на ней.

Общий характер электродинамической модели НЛА в виде ЭДЛ показан на *рисунке 1*, где в верхней части изображен НЛА, движущийся со скоростью  $\vec{V}$ , в нижней – его зеркальное изображение в ПЗ. Штриховые линии соответствуют двум проводам модели, расположенной вдоль траектории НЛА: верхней и отраженной в проводящем грунте: нижней.

Для собственной частоты незатухающих колебаний в ЭДЛ получено выражение:

$$f_{0_{\text{эдл}}} = \frac{V_c}{2\pi l_a} \sqrt{\ln\left(\frac{4h}{d_a} - 1\right) / \left(1 + 2\ln\frac{4h}{d_a}\right)},$$

где  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  – соответственно электрическая и магнитная постоянные в СИ;  $l_a$ ,  $h$ ,  $d_a$  – длина, высота полета и диаметр НЛА соответственно.

Результаты расчетов характеристик моделей ЭКК и ЭДЛ показали их сходство (*рисунк 2*). Точкой разделения областей применимости моделей является высота полета НЛА, при которой электрические характеристики ЭКК и ЭДЛ совпадают. По мере удаления ЛА от ПЗ взаимодействие ЛА с ней уменьшается, поэтому уменьшается собственная частота колебаний в ЭКК и ход графиков говорит о том, что для КР на высотах ниже 15...20 м электрические характеристики системы «НЛА – ПЗ» более реально отражает модель ЭДЛ, а на больших высотах – модель ЭКК. Для ЛА больших размеров эти высоты несколько выше.

Рис. 1 – Электродинамическая модель НЛА в виде двухпроводной линии

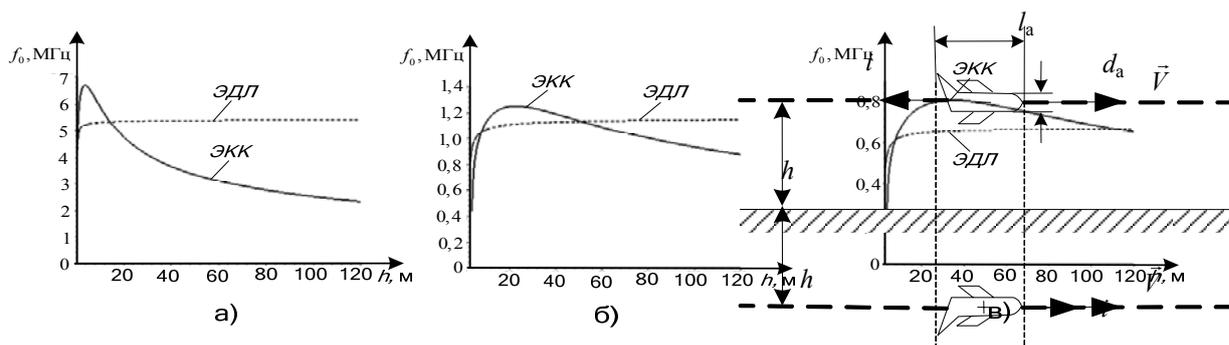


Рис. 2 – Зависимость частоты собственных электромагнитных колебаний  $f_0$  в ЭКК и в ЭДЛ от высоты  $h$ : а – КР; б – «Боинг-737»; в – ТУ-154

В дополнение к указанным моделям представим модель переизлучения ЭМВ, падающих на НЛА, в виде эквивалентного дипольного магнитного излучателя (ЭДМИ) [11]. Система «НЛА – ПЗ» рассматривается как рамочная антенна площадью  $S = 2hl_a$ , электродвижущая сила (ЭДС) в которой возникает в результате явления электромагнитной индукции (*рисунк 3*). Изменяющийся магнитный поток через площадь, ограниченную рамкой, может быть следствием электромагнитного фона естественного происхождения (например, фон атмосфериков) или иметь искусственное происхождение (например, излучение радиолокационной станции). Интерес к дипольному магнитному переизлучению вызван тем, что оно происходит как при наличии нескомпенсированного заряда на корпусе НЛА, так и в его отсутствие.

На *рисунке 4* показаны рассчитанные с помощью полученных выражений зависимости выраженной в относительных единицах излучаемой мощности  $N_{\text{отн}}$  от частоты (от  $\omega/\omega_0$ ) для различных коэффициентов затухания  $\beta$  электромагнитных колебаний в ЭДМИ [11].

Получено также выражение для коэффициента преобразования системой «НЛА – ПЗ» мощности  $\langle N_{\text{п}} \rangle$  падающих на нее ЭМВ в виде:

$$K_{\text{пв}} = \frac{\langle N_{\text{п}} \rangle}{\langle N_{\text{в}} \rangle} = \frac{\mu_0^2 \omega^8 \omega_0^4 S^3 C^2 \sin^2 \alpha}{6\pi V_c^4 \cos \alpha \left( R^2 C^2 \omega^2 \omega_0^4 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2 \right)},$$

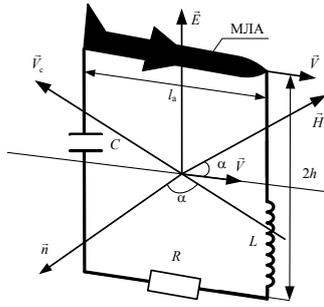


Рис. 3 – Падение ЭМВ на ЭДМИ

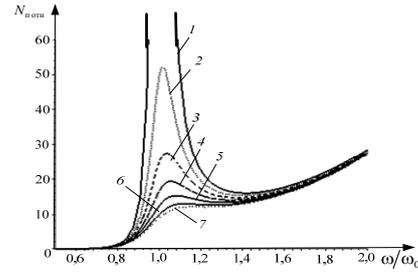


Рис. 4 – Зависимость  $N_{\text{отн}}$  от  $\omega/\omega_0$  ;

$$1 - \beta^2/\omega_0^2 = 0 ; 2 - \beta^2/\omega_0^2 = 0,005 ; 3 - \beta^2/\omega_0^2 = 0,01 ; 4 - \beta^2/\omega_0^2 = 0,015 ;$$

$$5 - \beta^2/\omega_0^2 = 0,02 ; 6 - \beta^2/\omega_0^2 = 0,025 ; 7 - \beta^2/\omega_0^2 = 0,03$$

где  $\omega$  – циклическая частота изменения напряженности магнитного поля падающей гармонической ЭМВ;  $\omega_0$  – частота собственных гармонических колебаний в эквивалентном ЭКК, являющемся аналогом ЭДМИ;  $C$ ,  $R$  – соответственно емкость и сопротивление указанного ЭКК;  $\alpha$  – угол падения ЭМВ на ЭДМИ;  $V_c$  – скорость ЭМВ в вакууме.

Из последней формулы видно, что коэффициент преобразования мощности  $K_{\text{по}}$  зависит от угла падения ЭМВ на ЭДМИ, как  $\sin^2 \alpha / \cos \alpha$ . Это свидетельствует о том, что при курсах, близких к встречному, в процессе переизлучения происходит резкое усиление энергии падающей ЭМВ и говорит о потенциальной возможности радиолокационного обнаружения НЛА.

### 3. МОДЕЛЬ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ НЛА

Существующий на Земле электромагнитный фон и наличие дольно частых местных гроз говорит о возможности пассивной локации НЛА путем регистрации переотраженного системой «НЛА – ПЗ» ЭМИ, возникающего при атмосферных разрядах.

Получены выражения и графики (рисунки 5, 6) для силы тока  $i(t)$  основного разряда молнии на различных его этапах и для ЭДС индукции  $\varepsilon(t)$ , возникающей в ЭКК [12, 13]:

$$i(t) = I(1 - e^{-\beta_1 t}), \quad \varepsilon_1(t) = -\frac{\mu_0 h_m h_l a |\cos \alpha| I \ln 10 \cdot 10^{-\frac{t}{T_1}}}{4\pi r \sqrt{r^2 + h_m^2}} \quad \text{– на этапе роста тока (при } t < T_0 \text{);}$$

$$i(t) = I e^{-\beta_2 (t - T_0)}, \quad \varepsilon_2(t) = \frac{\mu_0 h_m h_l a |\cos \alpha| I \ln 2 \cdot 2^{-\left(\frac{t - T_0}{T_2 - T_0}\right)}}{4\pi r \sqrt{r^2 + h_m^2}} \quad \text{– на этапе спада тока (при } t \geq T_0, t \leq 2T_2 \text{);}$$

и аналогичные выражения для повторных импульсов (при  $t \geq 2T_2$ ) [12], где  $I$  – максимальное значение силы тока разряда молнии;  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  – промежутки времени, за которые ток молнии соответственно возрастает до максимального значения, нарастает до 90 % максимального значения, максимальный ток  $I$  уменьшается вдвое;  $\beta_1, \beta_2$  – постоянные, зависящие от временных характеристик разряда;  $h_m$  – высота разрядного промежутка молнии;  $r$  – расстояние от центра ЭКК до разрядного промежутка молнии;  $\alpha$  – угол между вектором индукции магнитного поля тока молнии в центре ЭКК и вектором нормали к плоскости ЭКК.

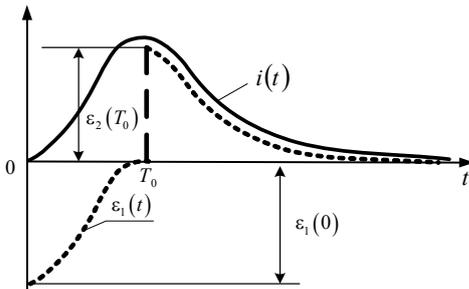


Рис. 5 – Зависимости силы тока и ЭДС индукции короткого импульса молнии от времени

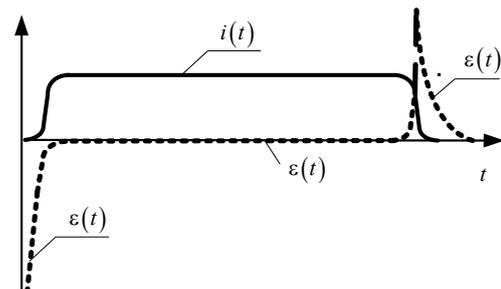


Рис. 6 – Зависимость силы тока и ЭДС индукции длительного импульса молнии от времени

Полученные выражения для  $\varepsilon(t)$  позволят определить силу тока, возникающего в контуре, и интенсивность излучаемой ЭМВ в целях решения задачи пассивной локации НЛА.

#### 4. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «НЛА – ПЗ» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЧАСТНЫХ ВОЕННО-ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

В процессе взлета и посадки любой ЛА можно считать НЛА. Есть ряд особенностей, отличающих процессы взлета ЛА, посадки и полета на постоянной высоте над ПЗ с огибанием рельефа местности или на средней высоте, примерно соответствующей постоянной высоте над уровнем моря. Распространение электродинамической модели взаимодействия НЛА с ПЗ на процессы взлета и посадки ЛА [14, 15] является актуальной задачей для целей разведки: ее решение позволяет определить интенсивность вылетов и посадки самолетов. Плотность взлета, соответствующая воздушному нападению, может являться фактором предупреждения и приведения в боевую готовность средств ПВО.

Электродинамическая модель НЛА в виде ЭДЛ с использованием в качестве зондирующего сигнала фонового излучения как искусственного, так и естественного происхождения может служить физической основой пассивных и полуактивных методов радиоразведки [16, 17].

В процессе полета самолеты, как правило, приобретают заряд порядка  $10^{-7} \div 10^{-4}$  Кл, который может перемещаться по корпусу ЛА, являясь источником ЭМВ. Потому собственное излучение ЭМВ всегда сопутствует процессу посадки самолета и его мощность тем больше, чем больше величина заряда корпуса ЛА.

При взлете заряд на ЛА отсутствует. Поэтому взлету соответствует только процесс переизлучения падающих на летательный аппарат ЭМВ.

Оценочный расчет максимальной высоты возникновения резонанса в ЭКК, которая зависит от удельного сопротивления грунта, геометрических размеров ЛА и его конфигурации, дает величину  $h_{\max} \approx 250$  м. Наличие такой максимальной высоты может повлиять на тактику применения ЛА, особенно истребительной авиации и КР дальнего действия.

Самолеты, стоящие на хранении на взлетно-посадочной полосе, так же обладают резонансными электромагнитными свойствами и могут переизлучать ЭМВ соответствующей частоты. Это означает потенциальную возможность электромагнитной разведки количества базирующейся на аэродроме группировки самолетов и селекцию их типов.

На основе модели ЭДЛ произведен расчет электрических параметров системы двух ЛА, установленных на одной линии параллельно друг другу. Используются наиболее характерные геометрические параметры отдельных типов боевой техники.

Отдельные результаты расчетов приведены в таблице и свидетельствуют о том, что резонансные частоты рассмотренных систем лежат в диапазоне гектометровых волн и разведку можно вести с помощью волн, огибающих неровности ПЗ и переотраженных от ионосферы.

Каждому ЛА (типу ЛА) соответствует свое значение частоты, что может быть использовано при разработке метода ведения разведки.

Важной особенностью предлагаемого метода является то, что ему невозможно поставить активную помеху. Для постановки электромагнитной помехи в диапазоне частот излучения НЛА требуется излучение в этом же диапазоне частот. В этом случае сигнал помехи становится зондирующим, усиливая принимаемый от НЛА эхо-сигнал. [18].

**Таблица**

Тип ЛА	Примерные геометрические характеристики ЛА			Электроемкость, нФ	Индуктивность, мкГн	Частота собственных колебаний, МГц
	Длина, м	Диаметр фюзеляжа, м	Размах крыла, м			
F-22А, истребитель	18,1	3	13,6	0,37	26,0	1,6
B52 - стратегический бомбардировщик	47,9	6	56,4	0,74	79,5	0,7
McDonnell Douglas F/A-18 Hornet-штурмовик	17,1	3	11,5	0,35	22,2	1,8
Lockheed SR-71-разведчик	32,8	5	16,9	0,73	41,0	1,0
AGM-88 HARM - противорадиолокационная ракета	4,2	0,25	1,3	0,08	5,8	7,4

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы.

- Электродинамическая модель НЛА может быть представлена в зависимости от высоты полета ЛА двумя частными моделями: ЭКК и ЭДЛ.
  - Обобщенной моделью взаимодействия НЛА с ПЗ является модель ЭДМИ, описывающая переизлучение внешнего ЭМИ как при наличии, так и в отсутствие нескомпенсированного заряда на корпусе НЛА.
  - Диапазон частот переизлучаемых системой «НЛА – ПЗ» электромагнитных волн имеет два режима распространения – приземный и ионосферный.
  - Электромагнитный фон, создаваемый атмосферным электричеством, может быть использован в пассивной радиолокации как фактор, приводящий к возбуждению ЭДС в системе «НЛА – ПЗ» и в результате – излучению указанной системой ЭМВ.
  - Используя особенности электродинамической модели НЛА, можно решать также частные задачи: получение разведывательных данных с аэродромов потенциального противника и определение интенсивности вылетов и посадки самолетов на них и др.
  - Предложенный метод пассивной радиолокации обладает высокой помехоустойчивостью, так как возможно использование активных помех в качестве зондирующего сигнала,
- Таким образом, проведенные исследования электродинамической модели НЛА свидетельствуют о практической возможности радиолокации НЛА за ГЗ.

#### Литература

1. *Жадобин, Ю. В.* Военная безопасность Республики Беларусь: итоги 2009 года и взгляд в будущее / *Ю. В. Жадобин* // сайт Министерства обороны РБ [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://www.mod.mil.by/>
2. *Локальные войны и вооруженные конфликты конца XX – начала XXI века* / Под ред. *И. А. Мисурягина*. – Минск: УО «ВА РБ», 2007.
3. *Гейстер, С. Р.* Устойчивая к огневому поражению система воздушной разведки может быть создана и развернута в Республике Беларусь уже в ближайшие 5 лет / *С. Р. Гейстер* // сайт Министерства обороны РБ [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.mod.mil.by/sistemarazvedki.html>
4. *Электродинамическая модель маловысотного летательного аппарата* / *В. В. Воинов* [и др.] // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2008. – № 15. – С. 62–66.
5. *Способ обнаружения маловысотного летательного аппарата*: пат. 13148 Респ. Беларусь / *В. В. Воинов* [и др.]; заявитель УО "ВАРБ"; зарегистр. 30.04.10 // Бюл. – № 2.
6. *Способ определения дальности до маловысотного летательного аппарата*: пат. 16878 Респ. Беларусь / *В. В. Воинов, И. А. Иващенко, Е. Н. Сасим*; заявитель УО «ВАРБ»; зарегистр. 10.10.2012 // – Бюл. – № 5.
7. *Способ определения курсового угла маловысотного летательного аппарата*: пат. 17272 Респ. Беларусь / *В. В. Воинов, И. А. Иващенко, Е. Н. Сасим, А. Ю. Липлянин*; заявитель УО «ВАРБ»; зарегистр. 27.03.2013 // – Бюл. – № 2.
8. *Способ определения радиальной скорости маловысотного летательного аппарата*: пат. 17288 Респ. Беларусь / *В. В. Воинов, И. А. Иващенко, Е. Н. Сасим, А. Ю. Липлянин*; заявитель УО «ВАРБ»; зарег. 27.03.2013 // – Бюл. – № 2.
9. *Липлянин А.Ю., Сасим Е.Н., Иващенко И.А.* Электродинамическая модель взаимодействия низколетящего летательного аппарата с подстилающей поверхностью // *Первый шаг в науку – 2012*: сб. матер. Междунар. форума уч. и студ. молодёжи «Первый шаг в науку – 2012» / НАН Беларуси. – Минск: Беларус. навука, 2012. – С.397–400.
10. *Моделирование электродинамических процессов, возникающих при движении маловысотного летательного аппарата с использованием электрических параметров двухпроводной линии* / *В.В. Воинов, В.М. Ивашко, И.А. Иващенко, Липлянин А. Ю.* и др. // *Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь*. – 2012. – № 2 (35). – С. 22–32.
11. *Липлянин А. Ю., Иващенко И. А.* Обобщенная модель взаимодействия низколетящего летательного аппарата с подстилающей поверхностью // Сб. науч. ст. курсантов Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – №11. – С. 49–51.
12. *Наведение электродвижущей силы в эквивалентном колебательном контуре атмосферным электричеством* / *В.В. Воинов, В.М. Ивашко, И.А. Иващенко, А.Ю. Липлянин, Л.В. Михайловская* // *Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь*. – 2011. – № 4 (33). – С. 85–94.
13. *Липлянин А. Ю., Иващенко И.А.* Возникновение электродвижущей силы индукции в эквивалентном колебательном контуре маловысотного летательного аппарата // Сб. науч. ст. курсантов Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – №9. – С. 114–115.
14. *Липлянин А.Ю., Воинов В.В.* Взаимодействие летательного аппарата с поверхностью Земли при взлете // *Актуальные вопросы авиац. науки и техники*: сб. тез. докл. 1-й междунар. молодеж. НТК / УО «ВА РБ». – Минск, 2011. – С. 214–217.
15. *Липлянин А.Ю., Воинов В.В.* Математическая модель влияния условий полета на характеристики электромагнитного взаимодействия маловысотного летательного аппарата с поверхностью Земли // *Содружество наук. Барановичи* – 2011: матер. VII Междунар. НПК молодых исследователей / УО «БарГУ» – 2011. – Ч.1. – С. 196–198.
16. *Липлянин А. Ю., Сасим Е. Н., Иващенко И. А.* Некоторые возможности использования полуактивного метода радиоразведки // *Содружество наук. Барановичи* – 2012: матер. VIII Междунар. НПК молод. иссл. / УО «БарГУ». – 2012. – Ч.1. – С. 136–137.
17. *Липлянин А. Ю., Сасим Е. Н., Иващенко И. А.* Возможности радиоразведки на длинных волнах // *Радиотехника и электроника: программа 48-й науч.-техн. конф., аспирант., магистр. и студ. / УО «БГУИР»*. – Мн., 2012. – С. 22–23.
18. *Липлянин А. Ю., Сасим Е. Н., Иващенко И. А.* Метод обнаружения низколетящих летательных аппаратов за горизонтом Земли на фоне активных электромагнитных помех // Сб. науч. ст. курсантов Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – №10. – С. 55–58.