

# Оценка зоны обзора парашютируемой системы радиомониторинга и стабилизация полёта при воздействии ветра

М.А. Воскобойников<sup>1</sup>, А.С. Подстригаев<sup>2,3</sup>, В.В. Давыдов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Профессора Попова 5, Санкт-Петербург, Россия, 197022

<sup>3</sup>АО «НИИ «Вектор», Академика Павлова 14а, Санкт-Петербург, Россия, 197376

**Аннотация.** В работе описана методика моделирования воздействий ветра на парашютируемую систему радиомониторинга. В результате моделирования в Matlab Simulink получены временные зависимости угла отклонения максимума диаграммы направленности антенны от вертикали при ветровых воздействиях. С помощью этих зависимостей получена оценка зоны обзора аппаратуры радиомониторинга на земле. Обоснованы и количественно оценены рекомендации по стабилизации полёта парашютируемой системы.

## 1. Введение

В настоящее время мониторинг состояния поверхности Земли используется для решения различных задач [1 – 3]. Наиболее эффективным решением задач, связанных с обнаружением на поверхности Земли источников радиоизлучения, является использование спутников с различными системами позиционирования [3 – 5]. Но возможности космических группировок даже крупных стран ограничены, поэтому на практике используются средства воздушного и наземного базирования. Для обеспечения высокой дальности действия и площади обзора наземных источников радиоизлучения модуль радиомониторинга целесообразно размещать на воздушном носителе [6, 7]. При выполнении задач, когда высока вероятность его утраты, данный модуль размещается на парашютируемом носителе. При этом направление максимума диаграммы направленности антенной системы модуля радиомониторинга зависит от конструкции парашюта, ветровых нагрузок и других параметров атмосферы.

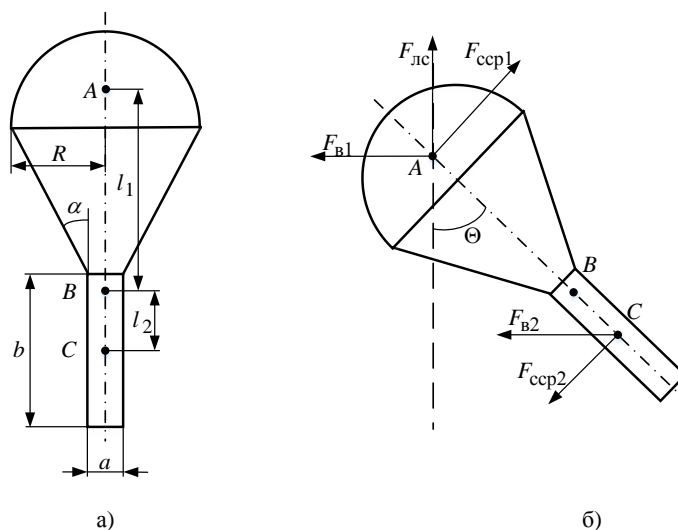
Для стабилизации во время полета системы «парашют-носитель» разработано множество способов, например, увеличение длины строп, уменьшение площади парашюта [8]. Однако, проведенный анализ показал, что исследования устойчивости системы «парашют-носитель» к ветровым нагрузкам проведены в не достаточном объеме для надежной эксплуатации данной системы в различных климатических условиях. В частности, отсутствуют данные по влиянию ветра с разными ускорениями и на разных высотах. Также отсутствуют сведения о характере временной зависимости отклонения продольной оси носителя от вертикали. Без этих данных достаточно сложно оценить зону обзора аппаратуры радиомониторинга на Земле при ветровых нагрузках во время полета.

Поэтому в качестве одного из возможных решений этой задачи разработана математическая модель и предложены методики её использования.

**2. Математическая модель системы «парашют-носитель»**

На рисунке 1 представлена система «парашют-носитель» для разработки математической модели её движения под действием ветровых нагрузок. В предлагаемой математической модели приняты следующие допущения:

- рассмотрена двумерная модель системы «парашют-носитель»;
- стропы и купол парашюта имеют высокую жесткость;
- силы приложены в двух точках: центр масс носителя и центр масс парашюта;
- носитель имеет цилиндрическую форму.



**Рисунок 1.** Рассматриваемая система: а) в состоянии покоя; б) при воздействии ветра. А – центр масс парашюта; В – точка вращения (центр масс системы «парашют-носитель»); С – центр масс носителя;  $l_1$  – расстояние от А до В;  $l_2$  – расстояние от С до В; а – диаметр носителя; b – длина носителя; R – радиус основания парашюта;  $F_{лс}$  – сила лобового сопротивления парашюта;  $F_{ссп1}$  – сила сопротивления среды парашюта;  $F_{ссп2}$  – сила сопротивления среды носителя;  $F_{В1}$  – сила действия ветра на парашют;  $F_{В2}$  – сила действия ветра на носитель;  $\alpha$  – угол между стропами парашюта и продольной осью антенны;  $\Theta$  – угол отклонения продольной оси антенны от вертикали.

По второму закону Ньютона для вращательного движения:

$$J \ddot{\Theta} = M, \tag{1}$$

где  $J$  – момент инерции тела,  $\ddot{\Theta}$  – угловое ускорение,  $M$  – момент приложенных к телу сил. Применив (1) для данного случая, получим:

$$J \ddot{\Theta} = F_{В1} \cdot l_1 \cdot \cos \Theta - F_{лс} \cdot l_1 \cdot \sin \Theta - F_{ссп1} \cdot l_1 - F_{В2} \cdot l_2 \cdot \cos \Theta - F_{ссп2} \cdot l_2, \tag{2}$$

где силы, приложенные к рассматриваемой системе, примут вид:

$$F_{В1} = 0,5 \cdot S_{пб}(\Theta) \cdot C_{пб}(\Theta) \cdot \rho \cdot V_{В}^2, \tag{3}$$

$$F_{лс} = 0,5 \cdot S_{пн}(\Theta) \cdot C_{пн}(\Theta) \cdot \rho \cdot V_{П}^2, \tag{4}$$

$$F_{ссп1} = 0,5 \cdot S_{пб} \cdot C_{пб} \cdot \rho \cdot \Theta^2, \tag{5}$$

$$F_{B2} = 0,5 \cdot S_H(\Theta) \cdot C_H(\Theta) \cdot \rho \cdot V_B^2, \quad (6)$$

$$F_{ссп2} = 0,5 \cdot S_H \cdot C_H \cdot \rho \cdot \mathcal{E}^2. \quad (7)$$

$S_{пб}$  – площадь проекции поверхности парашюта на вертикальную плоскость;  $C_{пб}$  – коэффициент аэродинамического сопротивления боковой поверхности парашюта;  $\rho$  – плотность воздуха на рассматриваемой высоте;  $V_B$  – скорость горизонтального ветра;  $S_{пн}$  – площадь проекции поверхности парашюта на горизонтальную плоскость;  $C_{пн}$  – коэффициент аэродинамического сопротивления нижней поверхности парашюта;  $V_{п}$  – скорость спуска парашюта на заданной высоте, зависящая от  $\rho$ ,  $C_{пн}$  и массы системы;  $\mathcal{E}$  – угловая скорость;  $S_H$  – площадь проекции боковой поверхности носителя;  $C_H$  – коэффициент аэродинамического сопротивления боковой поверхности носителя.

Так как силы сопротивления среды  $F_{ссп1}$ ,  $F_{ссп2}$  всегда направлены по касательной к круговой траектории движения, значения коэффициентов  $C_i$  и площадей  $S_i$  для них не зависят от угла  $\Theta$ :  $C_{пб} = C_{пб}(0)$ ,  $S_{пб} = S_{пб}(0)$ ,  $S_H = S_H(0)$ ,  $C_H = C_H(0)$  [9].

Момент инерции системы  $J$  можно найти следующим образом:

$$J = m_{п} \cdot l_1^2 + m_H \cdot l_2^2, \quad (8)$$

где  $m_{п}$  – масса парашюта,  $m_H$  – масса носителя.

Для исследования устойчивости системы «парашют-носитель» и оценки зоны обзора парашютируемой системы радиомониторинга на основе выражений (2) – (8) необходимо получить временные зависимости угла  $\Theta$  при различных параметрах системы «парашют-носитель». Так как аналитическое решение уравнений (2) – (8) при различных начальных условиях затруднено, для их решения использовалась система MATLAB Simulink.

### 3. Стабилизация системы «парашют-носитель» при воздействии ветра

Для решения системы уравнений (2) – (8) были заданы следующие параметры, которые соответствуют одной из возможных систем радиомониторинга:  $m_{п} = 0,3$  кг,  $m_H = 4$  кг,  $l_1 = 0,92$  м,  $l_2 = 0,07$  м,  $a = 0,08$  м,  $b = 0,325$  м,  $R = 0,399$  м,  $\alpha = 30^\circ$ .

Принимаем  $S_{пб}(0) = 0,5S_{пн}(0)$ . При повороте системы на  $90^\circ$  меняются местами площади проекций на горизонтальную и вертикальную плоскости. Тогда, считая, что  $S_{пб}(\Theta)$  при изменении угла  $\Theta$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  меняется линейно от  $0,25$  м<sup>2</sup> до  $0,5$  м<sup>2</sup>, получим, что  $S_{пн}(\Theta)$  при изменении угла  $\Theta$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  меняется линейно от  $0,5$  м<sup>2</sup> до  $0,25$  м<sup>2</sup>.

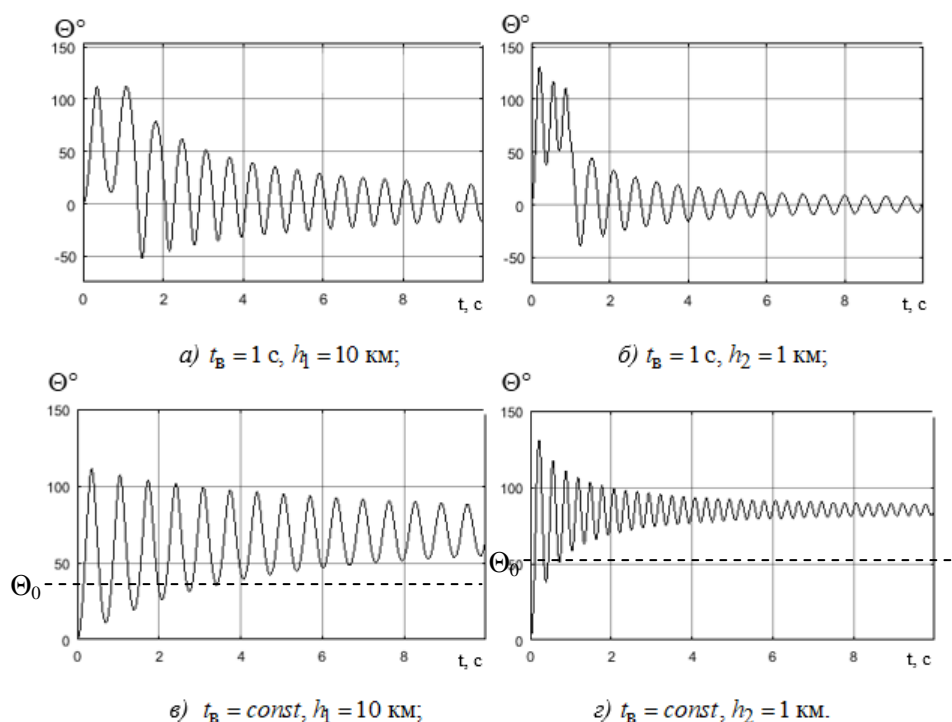
Аналогично,  $C_{пб}(\Theta)$  при изменении угла  $\Theta$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  меняется линейно от  $0,7$  до  $1,3$ , а  $C_{пн}(\Theta)$  при изменении угла  $\Theta$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  меняется линейно от  $1,3$  до  $0,7$ . На практике зависимости  $C_{пб}(\Theta)$  и  $C_{пн}(\Theta)$  не линейны, однако получить точные значения этих коэффициентов при изменении угла  $\Theta$  возможно только в аэродинамической трубе.

$S_{пб}(\Theta)$ ,  $S_{пн}(\Theta)$ ,  $C_{пб}(\Theta)$ ,  $C_{пн}(\Theta)$  от  $90^\circ$  до  $180^\circ$  изменяются в обратной последовательности.

В связи с малым влиянием сопротивления среды носителю пренебрегаем  $S_H(\Theta)$  и  $C_H(\Theta)$ , принимаем  $S_H = 0,05$  м<sup>2</sup>,  $C_H = 0,8$ .

Скорость ветра на высоте до 10 км очень редко превышает 30 м/с [10]. Исследована стабильность системы при скорости ветра  $V_B = 30$  м/с.

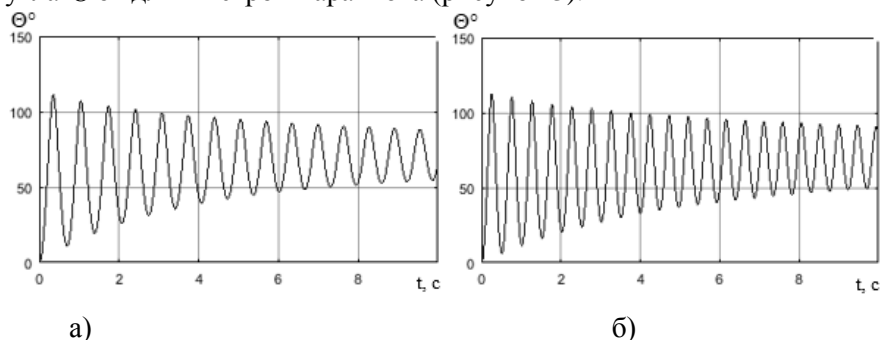
На рисунке 2 представлены временные зависимости угла  $\Theta$  при воздействии постоянного ветра и ветрового воздействия в течение 1 секунды для высот 1 км и 10 км.  $\Theta_0$  соответствует установившемуся значению угла.



**Рисунок 2.** Временная зависимость  $\Theta^\circ$  при кратковременном (*а*; *б*) и постоянном (*в*; *г*) ветровых воздействиях.

Анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением высоты: максимальный угол отклонения увеличивается, установившееся значение угла  $\Theta_0$  увеличивается (соответствует постоянному воздействию ветра), затухание происходит быстрее.

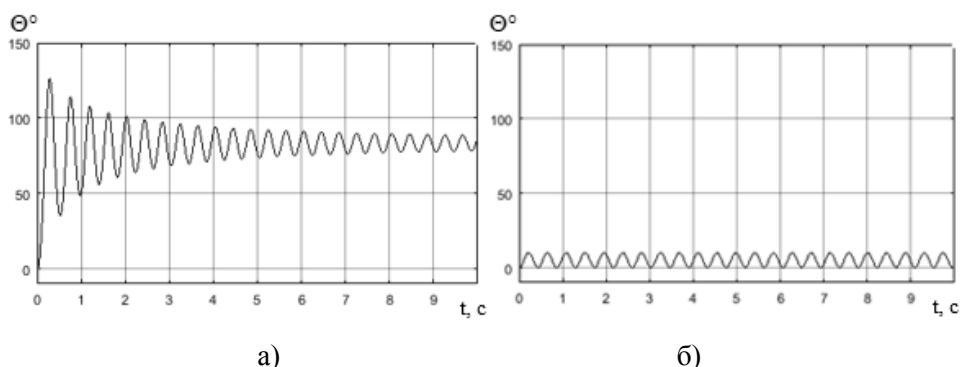
Кроме того, для определения устойчивости системы во время полета была исследована зависимость угла  $\Theta$  от длины строп парашюта (рисунок 3).



**Рисунок 3.** Временная зависимость  $\Theta^\circ$  при воздействии в нулевой момент времени постоянного ветра  $V_B = 30$  м/с при длине строп: *а*) 1 м; *б*) 0,5 м.

Полученные результаты показывают, что при уменьшении длины строп увеличивается амплитуда колебаний и их частота. Это означает, что длина строп парашюта для большей стабильности системы «парашют-носитель» должна быть подобрана на основании о данных по ветровой нагрузке в заданном районе её использования. Без этого высока вероятность сбоя в устойчивости системы во время полета.

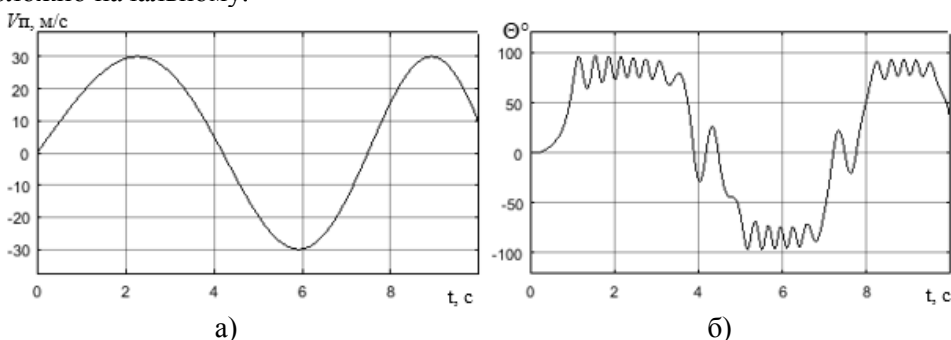
Разработанная модель позволила также исследовать зависимость угла отклонения  $\Theta$  от площади парашюта ( $S_{\text{ПН}}, S_{\text{ПБ}}$ ). На рисунке 4 представлены результаты для двух различных площадей парашюта.



**Рисунок 4.** Временная зависимость  $\Theta^\circ$  при воздействии в нулевой момент времени постоянного ветра  $V_B = 30$  м/с при а)  $S_{ПН} = S_{ПН}(0) = 1$  м<sup>2</sup>,  $S_{ПБ} = S_{ПБ}(0) = 0,5$  м<sup>2</sup>; б)  $S_{ПН} = S_{ПН}(0) = 0,1$  м<sup>2</sup>,  $S_{ПБ} = S_{ПБ}(0) = 0,05$  м<sup>2</sup>.

Установлено, что при меньшей площади парашюта наблюдается меньший угол отклонения  $\Theta$  при воздействии ветра. Необходимо также отметить, что колебания системы практически не затухают. Это необходимо учесть при определении зоны обзора аппаратуры во время радиомониторинга.

Предложенная математическая модель позволяет исследовать устойчивость системы при различных изменениях скорости ветра. На рисунке 5 в качестве примера представлено ветровое воздействие с «плавным» изменением скорости ветра и временная зависимость величины угла  $\Theta$  при этом воздействии. Отрицательное значение скорости – направление ветра противоположно начальному.



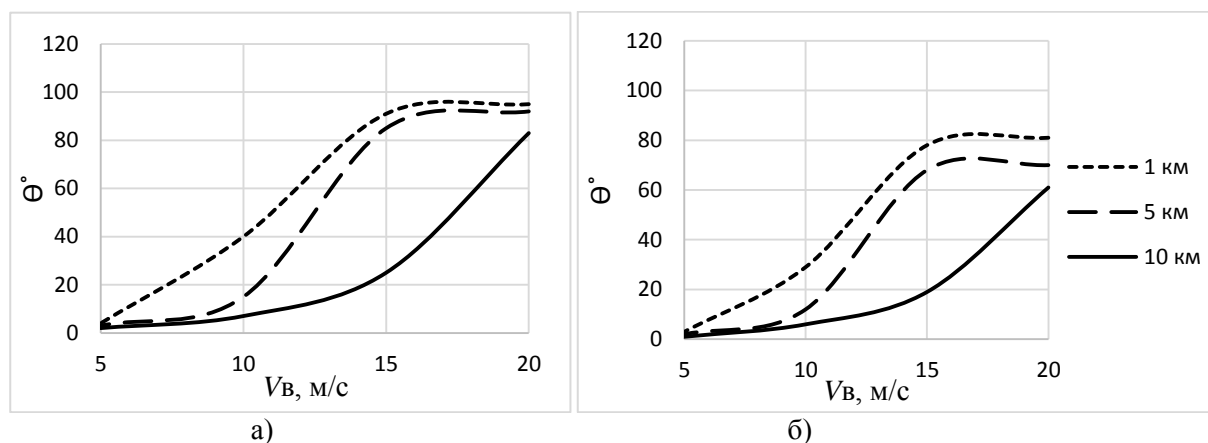
**Рисунок 5.** Временные зависимости: а) скорости ветра в м/с; б) величины угла  $\Theta^\circ$ .

При изменении скорости ветра без резких порывов угол  $\Theta$  изменяется плавно, доходя до максимального значения раньше, чем закончится увеличение модуля скорости. При приближении к пикам скорости начинаются колебания угла  $\Theta$ , что увеличивает ошибку в определении координат объекта при радиомониторинге. Предложенная модель позволяет оценить данную ошибку в пределах 2 – 3 м.

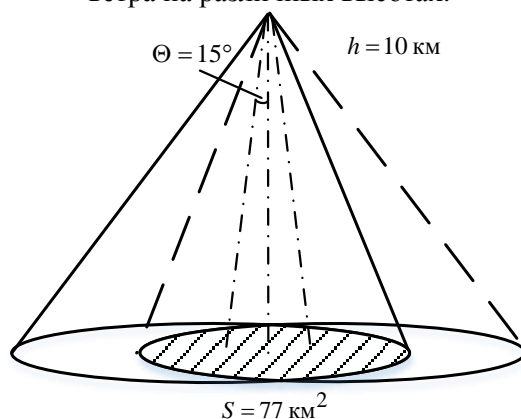
#### 4. Оценка зоны обзора аппаратуры радиомониторинга

На рисунке 6 представлены полученные в результате использования модели значения  $\Theta$  для различных высот и значений скорости ветра при заданных параметрах системы «парашют-носитель».

Полученный результат позволяет оценить движение зоны обзора парашютируемого модуля радиомониторинга по земной поверхности при воздействии ветра при заданных параметрах. На рисунке 7 в качестве примера представлен результат для случая, когда аппаратура радиомониторинга работает на высоте  $h = 10$  км, скорость ветра  $V_B = 13$  м/с.



**Рисунок 6.** Зависимости максимального (а) и среднего (б) углов отклонения  $\Theta^\circ$  от скорости ветра на различных высотах.



**Рисунок 7.** Оценка зоны обзора аппаратуры радиомониторинга при ветровых воздействиях.

Модель позволяет получить максимальный угол отклонения  $\Theta = 15^\circ$ , угол диаграммы направленности антенной системы равен  $60^\circ$ . В этом случае зона, обозримая аппаратурой радиомониторинга, испытывает колебания, но минимальная площадь  $S$ , в которой осуществляется радиомониторинг, будет составлять  $77 \text{ км}^2$ .

## 5. Заключение

Полученные результаты при использовании математической модели соответствуют данным полевых испытаний системы «парашют-носитель». Это делает возможным её использование для оценки зоны обзора аппаратуры радиомониторинга при ветровых воздействиях. А также для разработки методики оптимизации конструкции системы «парашют-носитель» перед её непосредственным использованием, зная предварительные данные о возможных ветровых нагрузках.

## 6. Литература

- [1] Podstrigaev, A.S. Features of the Development of Transceivers for Information and Communication Systems Considering the Distribution of Radar Operating Frequencies in the Frequency Range / A.S. Podstrigaev, A.V. Smolyakov, V.V. Davydov, N.S. Myazin, M.G. Slobodyan // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – 11118 LNCS. – P. 509-515.
- [2] Фокин, Г.А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин, Ф.Х. Аль-Одхари // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41-46.

- [3] Фокин, Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, 2009.
- [4] Petrov, A.A. Some direction of quantum frequency standard modernization for telecommunication systems / A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – 11118 LNCS. – P. 641-648.
- [5] Petrov, A.A. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, N.A. Lukashev, V.V. Davydov, N.V. Ivanova, N.S. Rodugina, A.V. Moroz // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012032.
- [6] Lenets, V.A. New method for testing of antenna phased array in X frequency range / V.A. Lenets, M.Yu. Tarasenko, V.V. Davydov, N.S. Rodugina, A.V. Moroz // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012037.
- [7] Шнурков О.И. Система разведки и целеуказания на базе спускаемых разведывательных модулей // *Морской сборник*. – 2013. – № 11. – С. 60-67.
- [8] Лялин, В.В. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения / В.В. Лялин, В.И. Морозов, А.Т. Пономарев. – М.: Физматлит, 2009. – 575 с.
- [9] Ковтуненко, В.М. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов / В.М. Ковтуненко, В.Ф. Каменко, Э.П. Яскевич. – Киев: Наукова Думка, 1977. – 156 с.
- [10] Зверев, А.С. Курс метеорологии (физика атмосферы) / А.С. Зверев, Б.В. Кирюхин, К.Я. Кондратьев. – Ленинград: Гидрометеорологическое издание, 1951. – 887 с.

## Assessment of the view area of parachuted radio monitoring system and stabilization of flight under wind forcing

M.A. Voskoboynikov<sup>1</sup>, A.S. Podstrigaev<sup>2,3</sup>, V.V. Davydov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya street 29, Saint-Petersburg, Russia, 195251

<sup>2</sup>Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU "LETI", Professor Popov street 5, Saint-Petersburg, Russia, 197022

<sup>3</sup>НИИ "Вектор", Academic Pavlov street 14a, Saint-Petersburg, Russia, 197376

**Abstract.** The paper describes a method of modelling the influence of wind forcing on the parachuted radio monitoring system. As a result of the modelling in Matlab Simulink, the time dependences of angular deviation of the antenna beam from vertical with wind influences were obtained. With the help of these dependencies, an estimate of the view area of the radio monitoring equipment on the ground was obtained. The recommendations for stabilizing the flight of a parachuting system are substantiated and quantified.