

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ РЕКТЕНН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

Баркова Мария Евгеньевна, аспирант, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Российская Федерация, г. Москва, Горюховский пер., 4, e-mail: Alttaira@yandex.ru

Проблемой использования солнечной космической электростанции является трансляция энергии с космического сегмента на наземный сегмент с минимальными потерями. В статье рассмотрены вопросы определения координат приемных пунктов наземного сегмента солнечной космической электростанции, ректенн (нелинейная антенна, способная преобразовывать СВЧ-излучение в электроэнергию), с помощью методов космической геодезии, а также обеспечения взаимной синхронизации между космическим и наземным сегментами электростанции для обеспечения трансляции энергии с минимумом потерь. Рассматривается методика выбора расположения ректенн на земной поверхности при известных параметрах орбиты космического сегмента солнечной электростанции и определение их координат с использованием методов космической геодезии в наземном сегменте солнечной космической электростанции. Построена трасса космического сегмента электростанции в зависимости от высот его орбит для определения местоположения ректенн.

Ключевые слова: солнечная космическая электростанция, наземный сегмент солнечной космической электростанции, местоположение ректенн в наземном сегменте солнечной космической электростанции, ректенны

DETERMINATION OF COORDINATES REKTENNS WITH USE OF METHODS OF SPACE GEODESY

Barkova Mariya Ye., post-graduate student, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 4 Gorokhovskiy per., Moscow, 105064, Russian Federation, e-mail: Alttaira@yandex.ru

Problem of use of the solar power satellite is broadcast of energy from a space segment on a land segment with the minimum losses. In article questions of determination of coordinates of places of acceptance of a land segment of SPS – rektenns (the nonlinear antenna capable to transform microwave radiation to the electric power), by means of methods of space geodesy, and also ensuring mutual synchronization between space and land segments of the satellite for ensuring broadcast of energy with a minimum of losses are considered. The technique of the choice of an arrangement rektenns on the land surface is considered at the known parameters of an orbit of a space segment of the solar satellite and determination of their coordinates with use of methods of space geodesy in a land segment of solar space power plant. The route of a space segment of the satellite depending on heights of its orbits for location definition rektenns is built.

Keywords: Solar Power Satellite, land segment of the Solar Power Satellite, location rektenn in a land segment of Solar Power Satellite, rektenns

Одним из способов использования энергии Солнца в качестве альтернативной энергетики является солнечная космическая электростанция (СКЭС). СКЭС состоит из космического и наземного сегментов. Космический сегмент (КС) СКЭС, благодаря расположению на орбите, аккумулирует солнечную энергию и транслирует ее посредством лазерного или СВЧ-канала на наземный сегмент (НС) СКЭС. Космический сегмент СКЭС может представлять собой как один космический аппарат (КА), так и систему КА. В данной рабо-

те космический сегмент СКЭС представлен одним КА. Наземный сегмент СКЭС включает в себя одну или несколько ректенн. В работах [2, 5–8, 10] рассматриваются различные варианты наземного сегмента СКЭС. Для эффективной работы СКЭС требуется произвести трансляцию энергии с минимальными потерями мощности. Минимальных потерь мощности при трансляции энергии можно достичь, получив точное положение космического сегмента СКЭС на орбите и координаты ректенн в наземном сегменте. Трансляция производится посредством СВЧ-тракта [1], в работах [2, 6] рассматривается лазерный канал передачи энергии.

В данной работе ставится задача разработать методику расположения ректенн в наземном сегменте СКЭС на основе полученного положения космического сегмента.

Постановка задачи. Рассматривается методика расположения ректенн в наземном сегменте СКЭС и уточнение их координат методами космической геодезии. Задается выходная мощность СКЭС N на ректенне и элементы орбиты КС СКЭС $\bar{\Theta}$.

Разработанный способ трансляции энергии предполагает вычислять минимальную дальность до ректенны и определять время трансляции энергии.

Требуется найти координаты ректенн q_{rect} в наземном сегменте СКЭС:

$$q_{rect} = f(N, \bar{\Theta}). \quad (1)$$

Точность трансляции энергии определяется взаимной ориентацией, передающей СВЧ-антенны и ректенны. Под точностью трансляции энергии понимается взаимная ориентация передающей СВЧ-антенны и ректенны во время передачи энергии.

Требуется найти координаты ректенн в наземном сегменте СКЭС, исходя из точности трансляции энергии $t_{trans.E}$:

$$t_{trans.E} = f(t_{positionKS}, t_{rect}), \quad (2)$$

где $t_{positionKS}$ – точность положения космического сегмента СКЭС на орбите, t_{rect} – точность определения координат ректенн.

Методика расположения ректенн в наземном сегменте СКЭС. Расположение ректенн в наземном сегменте СКЭС диктуется схемой трансляции энергии, которая в свою очередь зависит от параметров орбиты космического сегмента СКЭС. Методика расположения ректенн наземного сегмента СКЭС реализуется в три этапа:

- построение трассы космического сегмента СКЭС;
- предварительное расположение ректенн, исходя из цикличности орбиты КС СКЭС;
- уточнение координат ректенн наземного сегмента СКЭС, исходя из точности трансляции энергии методами космической геодезии.

Трасса космического сегмента СКЭС определяется на основе следующего алгоритма [3, 4]. Для привязки параметров орбиты КС СКЭС к поверхности Земли используется отображение его полета на фоне карты мира в виде подспутниковых точек, которые составляют трассу КА.

Широта подспутниковой точки определяется из сферического треугольника (рис. 1).

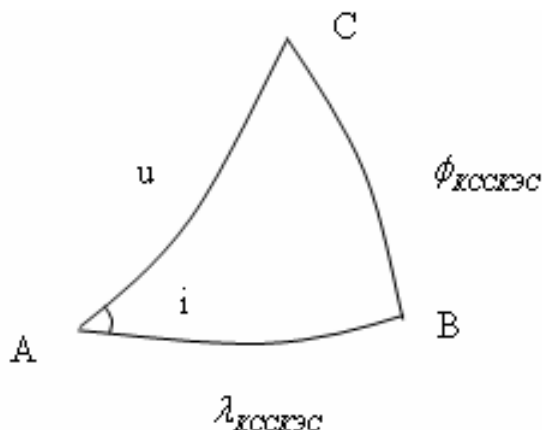


Рис. 1. Сферический треугольник:

Рассматривая рисунок 1, где $\phi_{KCKЭС}$ и $\lambda_{KCKЭС}$ обозначены астрономические широта и долгота подспутниковой точки космического сегмента СКЭС, u – аргумент широты, а i – наклонение орбиты, опираясь на теорему синусов, можно получить уравнение трассы спутника по широте:

$$\sin \phi_{KCKЭС} = \sin i \cdot \sin u, \quad (3)$$

где i – наклонение орбиты КС СКЭС, u – аргумент широты.

Географическую долготу $\lambda_{KCKЭС}$ подспутниковой точки находят из выражения:

$$S + \lambda_{KCKЭС} = \Omega + \arctg(tgu \cdot \cos i), \quad (4)$$

где S – звездное время, которое представляется как двугранный угол между гринвичским меридианом и меридианом, проходящим через точку весеннего равноденствия. Причем значение S задается следующим выражением:

$$S = S_0 + \omega_3 \cdot t, \quad (5)$$

где S_0 – угол звездного времени на 0 часов даты, ω_3 – угловая скорость вращения Земли $\omega_3 = 7.292115078 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, t – текущее время, отсчитываемое от 0 часов используемой даты.

В связи с несовпадением скорости вращения Земли вокруг собственной оси и скорости обращения КС СКЭС на низких (Low Earth Orbit – LEO) или средних (Medium Earth Orbit – МЕО) орбитах, происходит смещение трассы КС СКЭС с востока на запад. Все последующие проекции трассы КС СКЭС будут смещены относительно первоначальной на величину, равную в первом приближении $\Delta\lambda = \omega_3 \cdot T$, где T – период обращения КС СКЭС.

Для синхронизации космического сегмента СКЭС с наземным, орбита КС СКЭС должна обладать изомаршрутностью. Иными словами, КА, совершив некоторое количество витков, возвращается в исходную точку. Так как ректенны располагаются внутри цикла орбиты КС СКЭС, то требуется решение обратной задачи. Необходимо определить такую высоту орбиты, при которой КА совершал бы целое количество витков. Высоту орбиты можно найти из выражения $m \cdot T_3 = n \cdot T$, где период обращения КА по орбите задается

выражением $T = \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_3 + h_{KA})^{23}}{\sqrt{\mu}}$. Подставив период в исходное выражение и

выразив h_{KA} , получим:

$$h_{KA} = \left[\frac{\mu \cdot (m \cdot T_3)^2}{4\pi^2 \cdot n^2} \right]^3 - R_3. \quad (6)$$

Предварительное расположение ректенн определяется из схемы трансляции энергии СКЭС, которая в свою очередь зависима от следующих параметров: времени заряда аккумулятора на борту КС СКЭС, высоты орбиты и времени трансляции энергии. Время трансляции энергии по нормали в поверхности Земли будет определяться выражением:

$$t_{trans.E} = D / V_{MCV}, \quad (7)$$

где V_{MCV} – скорость распространения СВЧ-излучения в атмосфере, так как скорость распространения радиоволн в свободном пространстве равна скорости света в вакууме, то есть $V_{MCV} = c = 299792458 \text{ м/с}$, D – дальность до ректенны, причем $D_{\min} = h$.

Данные по трансляции энергии получены с помощью расчетов в созданном приложении на языке программирования C++ с помощью библиотеки Marble, виртуальный глобус (табл. 1) [9].

Таблица 1

Параметры синхронизации космического и наземного сегментов СКЭС

Высота орбиты КС СКЭС, тыс. м	2400	3000	3450	3940	4200	4700	4800
Наклонение, градусы	96	96	97	97,5	98	99	100
Время заряда аккумулятора на борту КС СКЭС при $C = 1000 \text{ Ф}$ и $I = 100 \text{ А}$, с	5400	7200	9000	10800	14400	18000	21600
Мощность КС СКЭС, кВт	100	200	300	400	500	600	700
Энергия, кДж	540000	1440000	2700000	4320000	7200000	10800000	15120000
Время трансляции энергии, с	7,700	7,702	7,704	7,705	7,706	7,708	7,708
Период обращения КС СКЭС, с	4321,68	5405,22	6125,10	7508,76	8041,38	9001,50	9183,72

Время трансляции энергии в таблице 1 состоит из времени разрядки аккумулятора и времени прохождения СВЧ-сигнала в атмосфере:

$$t_{P.A} = \frac{C}{I \cdot 1.3} + V \cdot D_{KA-ректенна}, \quad (8)$$

где C – емкость аккумулятора [Ф], I – ток в аккумуляторе [А], V – скорость распространения СВЧ-волн в атмосфере приблизительно равна скорости света в вакууме, $D_{KA-ректенна}$ – дальность от космического аппарата до ректенны. Время заряда аккумулятора на борту КС СКЭС определяется с учетом конструктивных особенностей КС и параметров орбиты.

Из таблицы 1 видно, что за полный период обращения вокруг Земли КС СКЭС успеет полностью зарядить аккумулятор в среднем шесть раз, следовательно, необходимо равномерно расположить шесть ректенн на Земле. Ректенны расположены в среднем через 60^0 , а значит, на территории России можно построить только три ректенны. Уточнение координат ректенн проводится с помощью методов космической геодезии. Привязка к пунктам опорной геодезической сети осуществляется по трем направлениям:

- определение длин сторон геодезической сети сгущения;
- ориентирование геодезической сети сгущения;
- определение координат пунктов геодезической сети сгущения в системе опорной геодезической сети [5].

Определим координаты пунктов с ректеннами на территории России, выбрав третье направление.

Орбитальный метод космической геодезии наиболее предпочтителен в использовании по сравнению с геометрическим. Это связано с тем, что орбитальный метод не использует ни одновременных, ни псевдоодновременных наблюдений.

Суть метода заключается в том, что производятся измерения с определяемых ректенн на известные положения космического сегмента СКЭС, что дает возможность вычислить координаты ректенн. Подробное описание метода и алгоритм решения находится в [11].

Оценка точности расположения ректенн. На рисунке 2, в качестве оценки точности, представлена трасса космического сегмента СКЭС на круговой солнечно-синхронной орбите с высотой 2400 тыс. м и наклонением 96^0 .

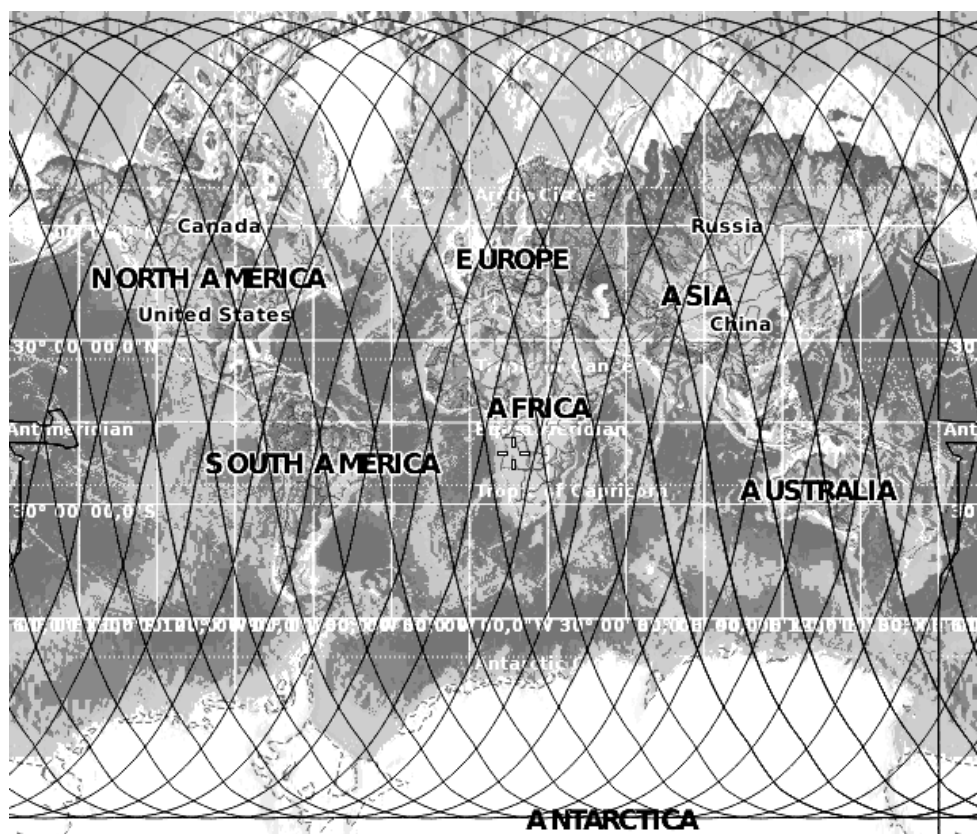


Рис. 2. Трасса орбиты КС СКЭС высотой 2400 тыс. м и наклонением 96^0

Трасса на рисунке 2 построена на атласной карте мира *srtm.dgml* при помощи географической библиотеки *Marble – Virtual Globe* авторства *Torsten Rahn* и *Inge Wallin*, выпускаемой под свободной лицензией *GNU LGPL*.

В соответствии с технологией эксплуатации СКЭС и методикой выбора орбиты, описанными ранее, получаем, что на территории России максимально можно разместить только три ректенны в силу высоты орбиты КС СКЭС и времени заряда аккумулятора.

Из приведенного рисунка видно, что смещение трассы происходит на $21,4^0$ в западном направлении.

На рисунке 3 изображена спутниковая карта мира *bluemarble.dgml* с трассой космического сегмента СКЭС и размещенными на территории России ректеннами.

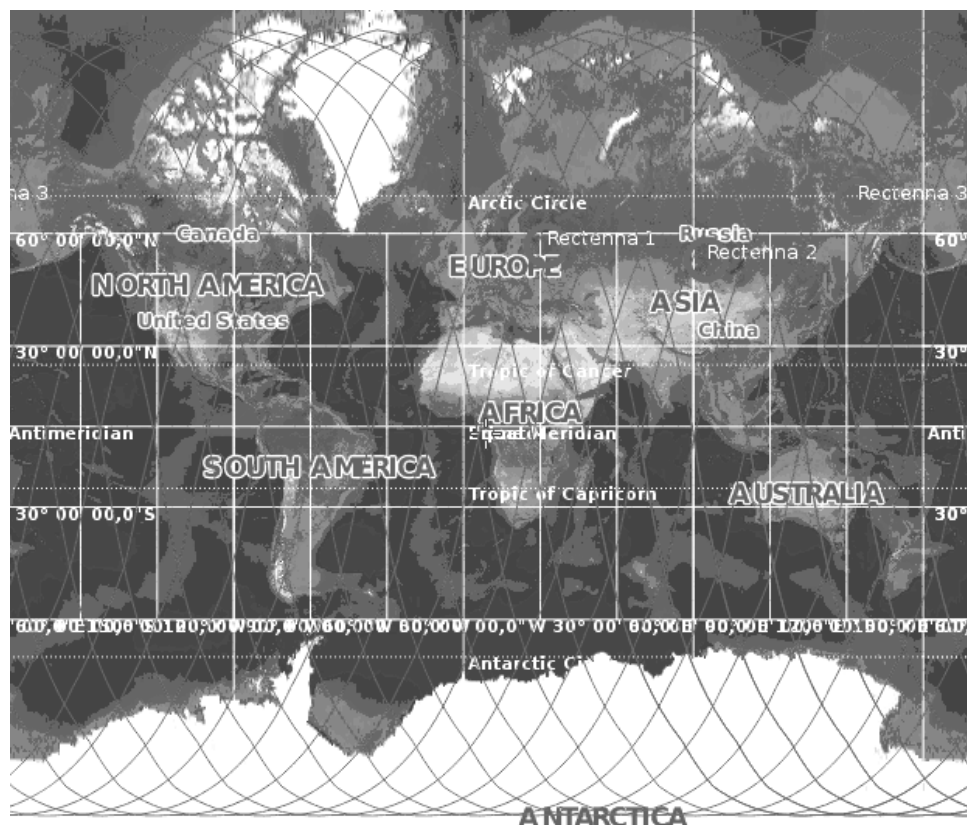


Рис. 3. Местоположение ректенн на территории России

На рисунке 4 приводится трасса круговой орбиты космического сегмента СКЭС высотой 4800 тыс. м и наклоном 100^0 . Трасса изображена на спутниковой карте мира *bluemarble.dgml*.

Из представленного рисунка видно, что смещение трассы происходит на $55,6^0$ в западном направлении. Таким образом, выбрав соответствующие орбитальные параметры, можно изменять условия наблюдения.

В таблицу 2 внесены географические координаты ректенн, расположенные между Москвой и Санкт-Петербургом, вблизи Красноярска и на Чукотском полуострове.

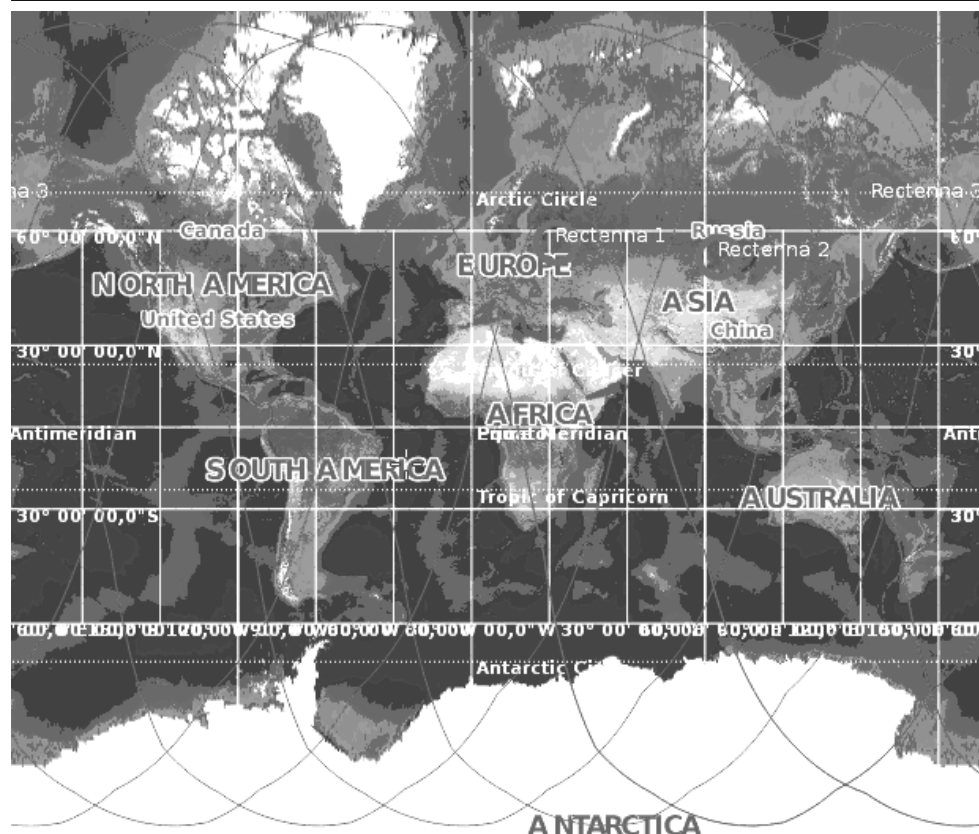


Рис. 4. Трасса орбиты КС СКЭС высотой 4800 тыс. м и наклонением 100°

Таблица 2

Расположение ректенн

Ректенны	Координаты
Ректенна 1	57,47 с.ш., 32,89 в.д.
Ректенна 2	54,46 с.ш., 95,44 в.д.
Ректенна 3	65,76 с.ш., 154,46 в.д.

Из рисунка 3 и таблицы 2 видно, что ректенны на территории России расположены приблизительно на одинаковом расстоянии друг от друга.

Заключение. Разработана методика расположения ректенн в наземном сегменте СКЭС. Она проводилась в три этапа: построение трассы космического сегмента СКЭС, определение предварительного местоположения ректенн в наземном сегменте СКЭС, уточнение координаты ректенн, исходя из требуемой точности трансляции энергии. Таким образом, получено расположение трех ректенн на территории России.

Список литературы

1. Бова Н. Т. Антенны и устройства СВЧ / Т. Г. Бова, Н. Б. Резников. – 2 изд. – Киев : Вища школа, 1982.
2. Вятлев П. А. Оценка эффективности космической солнечной электростанции на основе лазерного канала передачи энергии / П. А. Вятлев, А. О. Дмитриев, Х. Ж. Карчаев, В. К. Сысоев // Труды МАИ : электронный журнал. – 2016. – № 87. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=69658>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 31.5.2016).

3. Соловьев В. А. Управление космическими аппаратами : учебное пособие : в 2 ч. / В. А. Соловьев, Л. Н. Лысенко, В. Е. Люблинский. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2009. – Ч. 1.
4. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Люблинский В. Е. Управление космическими аппаратами : учебное пособие : в 2 ч. / В. А. Соловьев, Л. Н. Лысенко, В. Е. Люблинский. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2009. – Ч. 2.
5. Сысоев В. К. Анализ возможных схем построения космических солнечных электростанций / В. К. Сысоев, К. М. Пичхадзе, Е. А. Арапов // Полет. – 2010. – № 6. – С. 34–47.
6. Сысоев В. К. Анализ компоновочных схем демонстрационной солнечной космической электростанции / В. К. Сысоев, А. А. Барабанов, А. О. Дмитриев, И. М. Нестерин, К. М. Пичхадзе, Б. Т. Суйменбаев // Труды МАИ : электронный журнал. – 2014. – № 77. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=52959>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата публикации 02.10.2014).
7. Тищенко А. П. Геометрические методы космической геодезии / А. П. Тищенко. – Москва : Наука, 1971.
8. James O. McSpadden. Space Solar Power Programs and Microwave Wireless Power Transmission Technologie / James O. McSpadden, John C. Mankins. – 2012. – Режим доступа: <http://www.nss.org/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
9. Mr. John C. Mankins. SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array (A 2011-2012 NASA NIAC Phase 1 Project) / Mr. John C. Mankins. – 2012. – Режим доступа: <http://www.nss.org/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
10. Marble is a virtual globe and world atlas // Marble. – Режим доступа: <https://marble.kde.org/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
11. Sun Xin. Financial and Organizational Analysis for a Space Solar Power System / Sun Xin, Evelyn Panier, Cornelius Zuend, Raul Gutierrez Gomez. – France : Toulouse Business School Toulouse, 2009. – Режим доступа: <http://www.nss.org/settlement/ssp/library/2009-FinancialAndOrganizationalAnalysisForSSP.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

References

1. Bova N. T., Reznikov G. B. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and microwave ovens devices]. 2nd ed. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1982.
2. Vyatlev P. A., Dmitriev A. O., Karchaev H. Zh., Sysoev V. K. Otsenka effektivnosti kosmicheskoy solnechnoy elektrostantsii na osnove lazernogo kanala peredachi energii [Evaluating the effectiveness of space solar power plant on the basis of laser energy transmission channel]. *Trudy MAI : elektronnyy zhurnal* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute. Online journal], 2016, no. 87. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=69658> (accessed 31.05.2016).
3. Solovev V. A., Lysenko L. N., Lyubinskiy V. Ye. *Upravlenie kosmicheskimi apparatami* [Control of space vehicles], Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ. House, 2009, part 1.
4. Solovev V. A., Lysenko L. N., Lyubinskiy V. Ye. *Upravlenie kosmicheskimi apparatami* [Control of space vehicles], Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ. House, 2009, part 2.
5. Sysoev V. K., Pichkhadze K. M., Arapov Ye. A. Analiz vozmozhnykh skhem postroeniya kosmicheskikh solnechnykh elektrostantsiy [The analysis of possible schemes of creation of space solar power stations]. *Polet* [Flight], 2010, no. 6, pp. 34–47.
6. Sysoev V. K., Barabanov A. A., Dmitriev A. O., Nesterin I. M., Pichkhadze K. M., Suymenbaev B. T. Analiz komponovochnykh skhem demonstratsionnoy solnechnoy kosmicheskoy elektrostantsii [Analysis of layout schemes of demonstration solar space power plant]. *Trudy MAI : elektronnyy zhurnal* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute. Online journal], 2014, no. 77: Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=52959> (accessed 02.10.2014).
7. Tishchenko A. P. *Geometricheskie metody kosmicheskoy geodezii* [Geometrical methods of space geodesy], Moscow, Nauka Publ., 1971.
8. James O. McSpadden, John C. Mankins. *Space Solar Power Programs and Microwave Wireless Power Transmission Technologie*, 2012. Available at: <http://www.nss.org/>.
9. Marble is a virtual globe and world atlas. *Marble*. Available at: <https://marble.kde.org/>.
10. Mr. John C. Mankins. *SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array (A 2011-2012 NASA NIAC Phase 1 Project)*, 2012. Available at: <http://www.nss.org/>.
11. Sun Xin, Evelyn Panier, Cornelius Zuend, Raul Gutierrez Gomez. *Financial and Organizational Analysis for a Space Solar Power System*. France, Toulouse Business School Toulouse Publ. House, 2009. Available at: <http://www.nss.org/settlement/ssp/library/2009-FinancialAndOrganizationalAnalysisForSSP.pdf>.