

УДК 621.315

ФИЗИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ДОСТАВКИ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСТРОВ ХЕЛЕН

С. В. Пантелеев

ФБУ «12 ЦНИИ Минобороны России», г. Сергиев Посад

Получена 28 мая 2012 г.

Аннотация. Оценены физические ограничения доставки мощного электромагнитного излучения с космической платформы на остров Хелен. Учено возможное изменение теплофизических свойств материалов, безэлектродный и инициированный разряд в атмосфере. Определены предельно допустимые параметры излучения на Земле, что позволит судить о значении обсуждаемого способа получения энергии среди других альтернативных предложений.

Ключевые слова: Сверхвысокочастотное электромагнитное излучение, солнечные космические электростанции, разряд, остров Хелен.

Abstract. There were assessed the physical restrictions of powerful electromagnetic radiation delivery from space platform to Helen island. Also take account of such factors as electrodeless and initiated discharge in the atmosphere, possible change in the thermophysical properties of materials. There were defined the maximum permissible parameters of electromagnetic radiation on the surface of the Earth. That will judge the significance this method for producing energy among alternative modes.

Keywords: UHF – electromagnetic radiation, Solar space electric power plants, Discharge, Helen island.

Рост цен на углеводородное топливо, сокращение его запасов стимулируют поиск новых технологий получения энергии. Одной из них является использование энергии Солнца [1...8]. В 1976 году Вильям Браун

осуществил передачу СВЧ мощностью 30 кВт на расстояние 1,6 км. [2]. Работы, в первую очередь, связаны с тем, что солнечная энергия является одним из самых экологически чистых источников энергии. В настоящее время основными способами получения солнечной энергии являются солнечные батареи, гелиоэлектростанции и солнечные коллекторы. Успехи в этом направлении очевидны. В ближайшее время специалисты США планируют провести исследования по прямой трансформации солнечной энергии на спутнике (солнечной космической электростанции — СКЭС) в электромагнитные поля и передаче их на Землю. Проект реализуется на острове Хелен республики Палау в Тихом Океане. Площадь острова 0,03 км², население 3 чел.

Об этом проекте было объявлено на конференции ООН по проблемам изменения климата в Индонезии. На завершение проекта отведено немногим более четырех лет. Общая стоимость проекта может достигнуть 1 млрд. долларов США. На острове Хелен планируется собрать принимающую антенну диаметром около 80 метров. Спутник, вращающийся на орбите высотой не более 500 км, будет преобразовывать энергию Солнца в электромагнитную энергию СВЧ-диапазона, и передавать ее на Землю. Ректенна (от англ. rectify и antenna) будет преобразовывать ее в постоянное напряжение. Главная цель проекта — проверить, насколько такой метод получения электричества из энергии Солнца безопасен и эффективен на практике. Именно из соображений безопасности для реализации проекта по передаче солнечной энергии со спутника выбран необитаемый остров. Фотоэлектрические элементы будут размещены непосредственно на спутнике. Они будут преобразовывать солнечную энергию в энергию электромагнитного излучения. Такое преобразование эффективнее любого аналогичного преобразования наземными устройствами, т.к. при наземной переработке энергии Солнца в атмосфере теряется около 80% всей солнечной энергии, которую можно было бы использовать. Спутник будет пролетать над островом в Тихом океане один раз

в полтора часа, длительность передачи энергии будет составлять около пяти минут.

Полученную электроэнергию планируется использовать для восстановления рифового рыбоводства на островах. Планируется, что после окончания эксперимента на острове Хелен, данный способ преобразования энергии Солнца в электроэнергию может быть применён в промышленных масштабах.

Оценим предельно допустимые плотности энергии СВЧ-излучения, которые можно доставить с СКЭС на Землю. Одно из предельных физических ограничений полей обусловлено отсутствием фазовых переходов на поверхностях приёмного устройства. Для исследования этих величин учтем многократное отражения электромагнитного излучения на границах материалов и изменение их электродинамических и теплофизических свойств. Таким образом, приёмный элемент представлялся плоскостойкой средой, состоящей из N слоев, расположенных в плоскости x, y (схема расчетной модели представлена на рис.1).

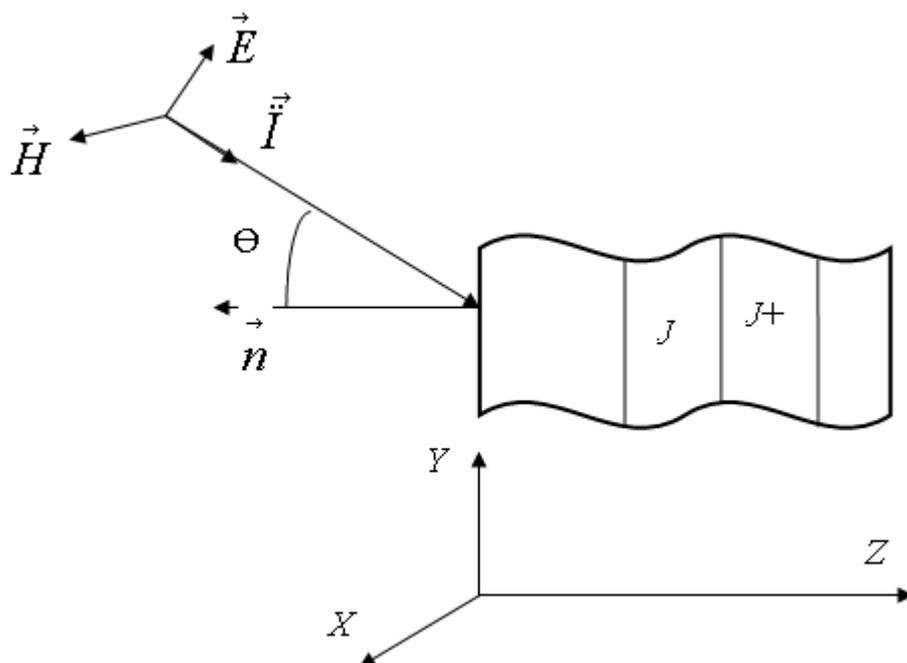


Рис.1. Схема расчетной модели.

Под углом Θ к оси Z из полупространства падает плоская монохроматическая волна $E \exp(i\omega t)$. Определим электромагнитное и температурное поля во всех слоях с учетом зависимости диэлектрических $\epsilon_i(T)$ и $\operatorname{tg} \delta_i(T)$ и теплофизических $a_i(T)$ и $c_i(T)$ свойств от температуры. Баланс тепла в каждом слое опишем уравнением:

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta Z} \left(a \frac{\delta T}{\delta Z} \right) - Q^* - Q_{\text{эл}} + Q_{\text{мг}}, \quad (1)$$

где ρ , c , a — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплоёмкости среды.

Величина Q^* — сток тепла при фазовых или химических превращениях, $Q_{\text{эл}}$ — тепловой эффект за счет диэлектрических потерь:

$$Q_{\text{эл}} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon^0 \omega \operatorname{tg} \delta / E^2,$$

где ω — круговая частота;

E — вектор электрической составляющей поля.

Соответственно, $Q_{\text{мг}} = \frac{1}{2} \mu \mu^0 \omega \operatorname{tg} \delta_m / H^2$.

В материалах естественной среды обычно $Q_{\text{эл}} \gg Q_{\text{мг}}$.

Уравнение (1) дополнялось граничными условиями: на границе слоев — условия теплового контакта:

$$T^j = T^{j+1}; \quad a^j \frac{\delta T}{\delta Z} \Big|_j = a^{j+1} \frac{\delta T}{\delta Z} \Big|_{j+1};$$

На внешней стороне — условия радиации без конвекции:

$$-a \frac{\delta T}{\delta Z} = \sigma T^4,$$

на тыльной стороне — условия радиации с конвекцией:

$$-a \frac{\delta T}{\delta t} = \sigma T^4 + \lambda (T_{\text{н}\delta} - T),$$

где $T_{\text{сп}}$ — температура среды с тыльной стороны,

α — коэффициент теплообмена.

В каждом слое выполняются уравнения Максвелла:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}, \quad \text{div} \vec{D} = 0, \quad \vec{D} = \epsilon \epsilon \vec{E} \quad (2) \\ \vec{\text{rot}} \vec{H} = \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} + \vec{y}, \quad \text{div} \vec{B} = 0, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (3) \end{array} \right.$$

на границах сред — переходные условия

$$\vec{E}_{t,j} = \vec{E}_{t,j+1}; \quad \vec{H}_{t,j} = \vec{H}_{t,j+1},$$

где j — номер слоя,

t — тангенсальная составляющая вектора.

Во внешней среде задана падающая волна $E \exp(i\omega t)$, а на границе последнего слоя — коэффициент отражения:

$$V_n = E_{\text{отр}} / E_{\text{пад}}.$$

Если последняя среда идеальный проводник, то $V_n = -1.0$, если воздух, то $V_{n+1} = 0$.

Вся система уравнений дополнялась зависимостями электрофизических свойств от температуры:

$$\epsilon^j = \epsilon^j(T), \quad \text{tg} \delta_j = \text{tg} \delta_j(T), \quad a_j = a_j(T), \quad c_j = c_j(T), \quad \rho_j = \rho_j(T),$$

Эти зависимости задаются либо на основе экспериментальных данных, либо рассчитываются на основе феноменологических представлений.

Система соотношений (1)...(3) полностью описывает задачу о нелинейном проникновении электромагнитного поля в среду с учетом физико-химических превращений, происходящих под действием поглощенного электромагнитного поля.

На основании проделанных исследований можно заключить, что предельные уровни, определяемые началом фазовых переходов на различных материалах при падении излучения на остров Хелен в течение 5 минут, ограничены десятками киловатт на квадратный метр. С учетом этого и при диаметре приемной антенны на острове 80 метров общая мощность

принимаемой СВЧ-энергии может быть 0,6 ГВт. Можно ли избежать этого ограничения? Это возможно сделать по нескольким направлениям. В первую очередь использовать в приёмных устройствах специальные материалы, стойкие к электромагнитному излучению.

Вторым физическим эффектом, ограничивающим мощность излучения, доставляемую на приемное устройство, является безэлектродный СВЧ-разряд. Высота его возникновения будет определяться диаметром луча, а плотность потока энергии для его возникновения зависит от длины волны излучения. Пространственно-временную характеристику СВЧ-разряда можно описать системой многомерных диффузионных уравнений электрон-ионной кинетики. Систему уравнений электрон-ионной кинетики можно записать в виде [9...12]

$$\begin{aligned} \frac{\delta N}{\delta t} &= g_i + v_{ion} N - \beta_e N_m N - \alpha_0 N N_+ + \sigma_c N_m N_- + j N_- - div j_e, \\ \frac{\delta N_-}{\delta t} &= \beta N_m N - \gamma N_- \sigma_c N_m N_- - \beta_- N_- N_+ - div j_- \\ \frac{\delta N_+}{\delta t} &= g_i + v_{ion} N - \alpha_0 N N_+ - \beta_- N_- N_+ - div j_+, \end{aligned} \quad (4)$$

где N , N_- , N_+ , N_m — плотность электронов, отрицательных и положительных ионов и молекул газа;

g — интенсивность ионизации атмосферы ультрафиолетовым и рентгеновским излучением Солнца;

v_{ion} — частота ионизации атмосферы СВЧ излучением;

β_e — коэффициент прилипания;

α_0 — эффективный коэффициент диссоциативной рекомбинации;

σ_c — коэффициент отлипания электронов от отрицательных ионов при соударении;

γ — коэффициент отлипания электронов от отрицательных ионов под действием фотонов;

β — коэффициент ион-ионной рекомбинации.

Последние члены в правых частях уравнений (4) описывают диффузию частиц из разрядной области, поток частиц сорта

i -е, N_+ , N_- :

$$\gamma_i = FN_i b_i E_q - D_i \Delta N_i,$$

где b_i — подвижность частиц сорта i ;

E_q — величина амбиполярного поля плазменной области [13, 14];

D_i — коэффициент диффузии частиц.

Потоки частиц из области разряда:

$$\operatorname{div} j_i = \pm b_i \nabla N_i E_q - D_i \nabla^2 N_i,$$

где знак «+» для положительных ионов.

Принято, что коэффициенты диффузии не зависят от координат.

Амбиполярное поле разрядной области определяется из уравнения Пуассона:

$$\operatorname{div} E_a = 4\pi e [N_+ - (N_+ + N_-)].$$

Пороговая величина полей СВЧ-разряда для непрерывного режима определялась из условия $\delta N/t > 0$. Для импульсного режима за условия возникновения разряда принималось равенство $\epsilon_p = 0$, где ϵ_p — диэлектрическая проницаемость разрядной области

$$\epsilon_p = 1 - \frac{N}{N_{kp}} \frac{1}{1 + (v_m / \omega)^2},$$

$$N_{kp} = m\omega^2 / 4\pi e^2 = 1,12 \cdot 10^{13} \lambda^{-2}.$$

На рис.2. представлены зависимости пороговых ППЭ, рассчитанных по уравнениям (4), и их сравнение с приведенными значениями в [1]. В расчетах радиус луча СВЧ-излучения принимался равным радиусу на уровне -3 дБ по ППЭ. Зависимость пороговых ППЭ от высоты в невозмущенной атмосфере представлена на рис.3. Режим облучения непрерывный. Из рис.3 видно, что минимальная пробойная ППЭ при $\lambda = 3,0$ см составляет 4 МВт/м^2 и находится в

области высот $40 \text{ км} \leq H \leq 80 \text{ км}$. С уменьшением длины волны значение W_{\min} увеличивается и достигает при $\lambda = 0,3 \text{ см}$ и $W_{\min} = 500 \text{ МВт/м}^2$ на высотах $35 \text{ км} \leq H \leq 65 \text{ км}$.

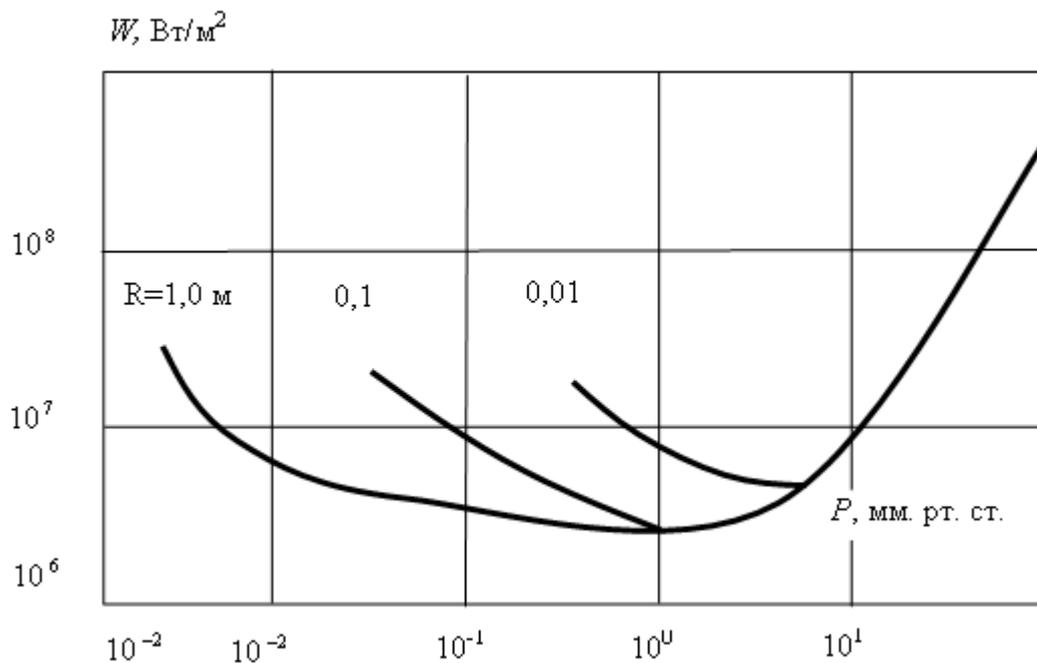


Рис. 2. Зависимости пороговых ППЭ.

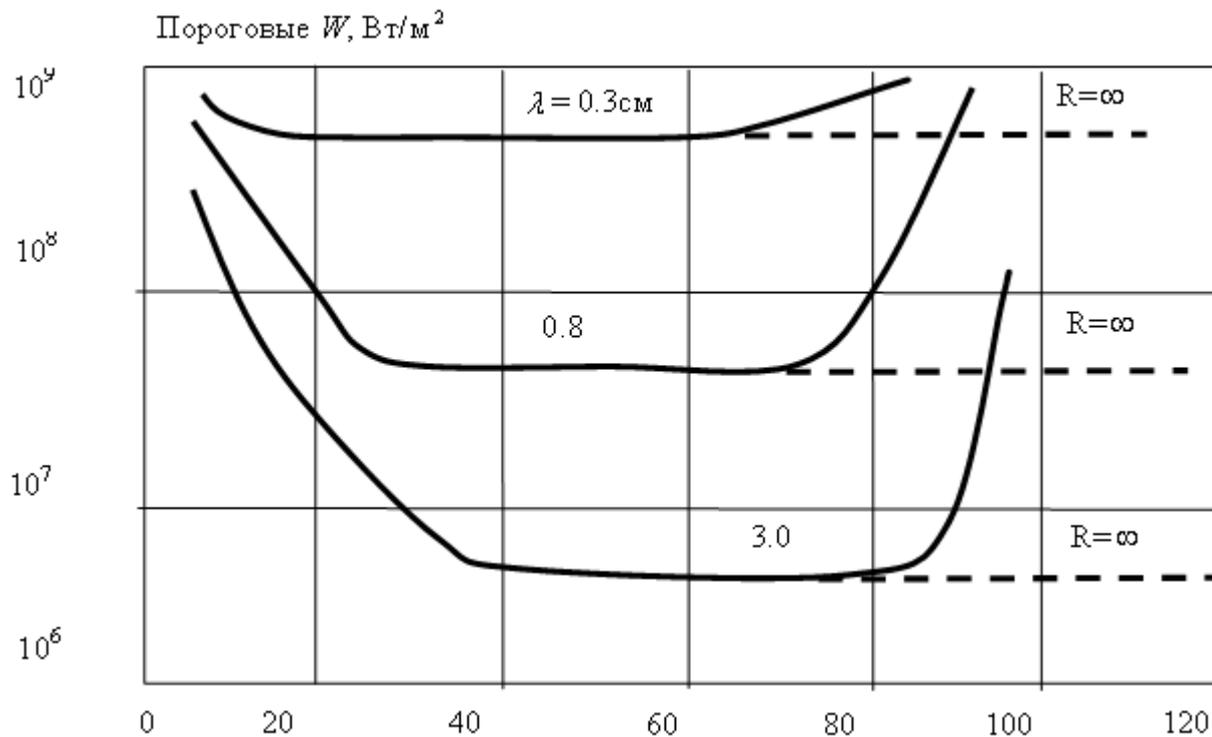


Рис. 3. Зависимость пороговых ППЭ от высоты в невозмущенной атмосфере.

Важно, что при увеличении радиуса пятна пороговые ППЭ уменьшаются и в пределе при $r \rightarrow \infty$ становятся равными W_{\min} .

Для излучения, планируемого к использованию с целью передачи энергии на остров Хелен, при диаметре луча несколько метров предельные уровни могут составлять 2-3 МВт/м². Однако это ограничение можно избежать специальными конструкторскими решениями космических передающих устройств.

Третьим физическим эффектом, ограничивающим мощность излучения СКЭС и мощность, подводимую на остров, является инициированный СВЧ-разряд. В настоящее время существует несколько физико-математических моделей инициирования плазмы СВЧ-разряда. Модель, предложенная автором [14], основана на предположении усиления поля на диэлектрических неоднородностях. Для определения качественной картины инициирования разряда предлагается использовать модель волокнистого изолятора. Ранее эта модель применялась для объяснения снижения пробойных напряжений емкостей при постоянном и переменном токе [15]. Модель состоит из параллельных цилиндрических стержней одинакового радиуса r и бесконечной длины, расположенных в вершинах квадратов со стороной a . При условии $r < a$ значение максимальной напряженности поля можно определить как

$$E_{\max} = \frac{2\varepsilon}{(\varepsilon - 1) \left[\frac{\varepsilon + 1}{L - 1} - \Theta - 0,306 \frac{\varepsilon - 1}{L + 1} \Theta^4 \right]} E_{\text{н\ddot{o}}},$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость волокон;

Θ — концентрация волокон;

$$\Theta = \pi r^2 / a^2,$$

r — радиус волокон;

a — расстояние между волокнами;

E_{cp} — напряженность электрического поля, падающая на модель;

E_{\max} — максимальное поле у модели.

Условие развития разряда у такой модели описывается двумя системами уравнений типа (4). Одна из систем описывает разряд в свободной атмосфере, вторая у модели. Порогу развития разряда соответствует наименьшая напряженность поля, получаемая из решения таких систем [14].

На рис.4. представлены результаты расчета критических полей разряда у выбранной модели. При атмосферном давлении пороги развития разряда, примерно, 20 МВт/м^2 .

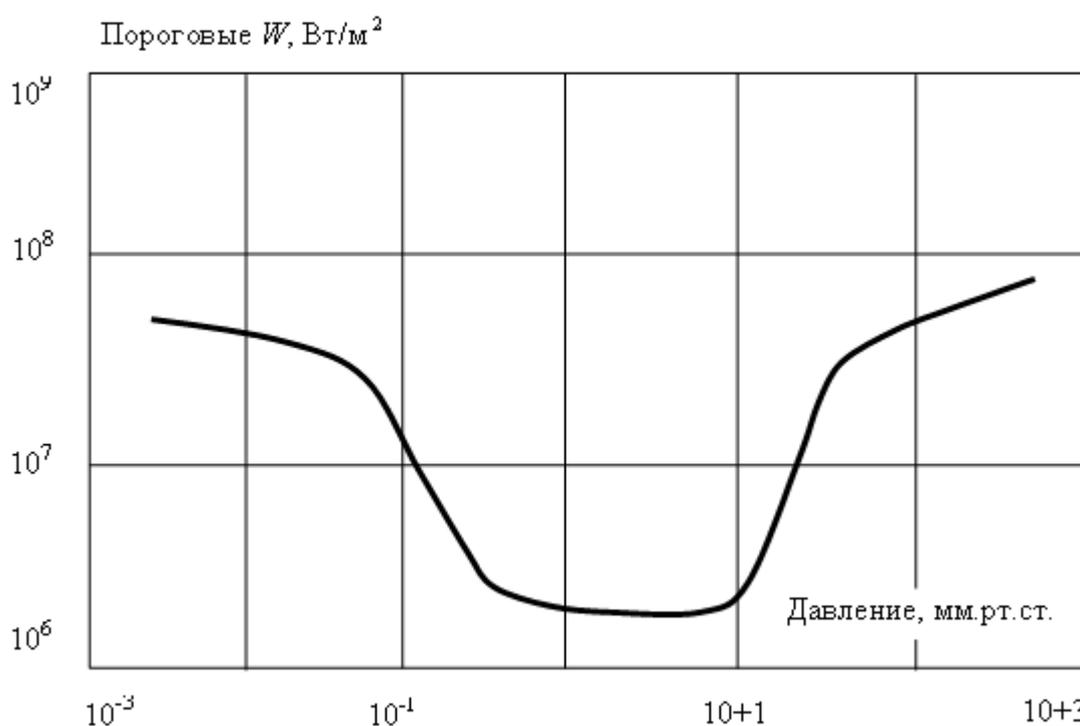


Рис. 4. Результаты расчета критических полей разряда у выбранной модели.

Проведены расчетные оценки снижения порогов инициирования разряда материалами с различными диэлектрическими характеристиками и разными размерами неоднородностей. Модели могут быть применены для оценки порогов разряда в атмосфере у поверхности различных структур. Расчетные оценки тестированы экспериментальными исследованиями. Оценка уровней инициирования пробоя применительно к рассматриваемому проекту составляет $20 \dots 30 \text{ МВт/м}^2$, что в несколько раз больше ограничений по теплофизическим эффектам. Таким образом, энергия СВЧ-излучения, которую можно доставить на Землю, определяется:

1. Отсутствием фазовых переходов на элементах приемной антенны и окружающей структуры. Мощность СВЧ-излучения на приемнике может достигать при этом 0,6 ГВт.

1. Безэлектродным пробоем атмосферы, что ограничит мощность принимаемого СВЧ-излучения 70 ГВт.

2. Инициированным разрядом у облучаемой поверхности и составляет по принимаемому СВЧ излучению 360 ГВт.

Если предположить, что КПД преобразования СВЧ-излучения в электроэнергию составит 10 процентов, то, с учетом физических ограничений по недопустимости фазовых переходов на наземных объектах, мощность станции острова Хелен может достигать 0,6 ГВт. Меры по устранению возникновения фазовых переходов на наземных объектах и преодолению слоя атмосферы на высотах 40...60 км могут довести мощность станции до десятков ГВт.

Литература

1. Glaser P.E. Power from the Sun: it's Future. // Science. vol. 162, p. 857, 1968.

2. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Проблемы солнечных космических электростанций. // Успехи физических наук, т. 123, вып. 4, с. 633, декабрь 1977.

3. Грилихес В.А. Солнечные космические энергостанции. «Наука», Л-д. 1986.

4. Ванке В.А., Лесков Л.В., Лукьянов А.В. Космические энергосистемы. М: Машиностроение, 1990.

5. Ванке В.А. Электроэнергия из космоса - солнечные космические станции. // Журнал радиоэлектроники. 12, 2007

6. Нариманов Е.А. Космические солнечные электростанции. Москва «Знание», 1991.

7. Нагатоно М., Сасаки С., Наруо Й., Ванке В.А. // Работы Института космических исследований Японии в области космической энергетики. // Успехи физических наук, , т. 164, с. 631, июнь 1994.
8. СВЧ энергетика. Под редакцией Э. Окресса. «Мир», Москва, 1971.
9. Мак – Дональдс А. Сверхвысокочастотный пробой в газах, «Мир», Москва, 1969.
10. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. «Наука», Москва, 1973.
11. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. «Наука». Москва, 1974.
12. Смирнов Б.М. Физика слабоионизованного газа. «Наука», Москва, 1978.
13. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А. Основы физики плазмы. «Атомиздат», Москва, 1977.
14. Пантелеев С.В. «Powerful Ultrahighfrequency Electromagnetic Interaction with Multilayer Heterogeneous Materials» // AMEREM 96, Albuquerque, USA, 1996.
15. Сканапи Г.И. Физика диэлектриков. ФМГИ, Москва, 1969.