

ДИНАМИКА ЗАХВАТА И ПОСЛЕДУЮЩЕГО СЕРФОТРОННОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Г.С. Мкртчян

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация
E-mail: hay-13@mail.ru

Рассмотрена и исследована динамика заряженных частиц при их серфинге на электромагнитных волнах в космической плазме. С помощью численных расчетов рассмотрены траектории заряженных частиц на фазовой плоскости, захват частиц волной в эффективную потенциальную яму с последующим сильно релятивистским ускорением. Учитывалось возможное циклотронное вращение частиц до их захвата волной. Установлено, что на фазовой плоскости траектория захваченных частиц имеет особую точку типа устойчивый фокус, а поведение траектории соответствует движению в достаточно сложном нелинейном, нестационарном эффективном потенциале. Получены асимптотики основных характеристик ускоренных частиц. Указана причина возникновения наблюдаемых вариаций потоков космических лучей с реализацией механизма серфотронного ускорения частиц электромагнитными волнами в сравнительно спокойной космической плазме.

Ключевые слова: захват; черенковский резонанс; траектории заряженных частиц; структура фазовой плоскости; устойчивый фокус; потенциальная яма; серфинг заряженных частиц; космическая плазма.

Введение

Серфотронное ускорение заряженных частиц – это их ускорение плазменной волной в направлении вдоль фронта волны, которое обусловлено присутствием стационарного магнитного поля [1]. Серфинг заряженных частиц на электромагнитных волнах в космической плазме может быть одним из главных механизмов формирования потоков ультрарелятивистских частиц (см., например, работы [2–14]). Необходимые условия реализации серфинга заряженных частиц в магнитоактивной космической плазме следующие.

1. Фазовая скорость электромагнитной волны в плазме должна быть меньше скорости света в вакууме и тогда возможен черенковский резонанс при взаимодействии волна-частица.

2. Амплитуда волны должна быть больше некоторого порогового значения, которое сравнительно невелико и можно пренебречь нелинейностью плазмы. При выполнении этого условия и при наличии внешнего магнитного поля возникает эффективный потенциал. Он удерживает частицу в ускоряющей фазе поля электромагнитной волны.

3. В режим ускорения захват частиц происходит для диапазона благоприятных фаз волны на траектории ускоряемой частицы. Этот диапазон может быть достаточно широким. Во время захвата скорость заряженных частиц в направлении распространения волны должна быть весьма близка к фазовой скорости волны.

В данной работе приведены результаты численных расчетов захвата слабoreлятивистских электронов и их последующего сильного серфотронного ускорения в магнитоактивной космической плазме при черенковском резонансе с электромагнитных волн, которые распространяются поперек внешнего магнитного поля. Задача сведена к численному решению нелинейного, нестационарного уравнения второго порядка для фазы одной из волн на траектории частицы. Численные расчеты показали, что имеется достаточно широкая область благоприятных начальных фаз волн для реализации серфинга заряженных частиц на электромагнитных волнах. Для захваченных частиц исследуется пространственно-временная картина фазовой плоскости для нелинейного уравнения. Численные расчеты показали, что при сильном ускорении заряженных частиц на фазовой плоскости траектория изображающей точки по спирали приближается к особой точке типа устойчивый фокус. Заряженные ускоряемые частицы накапливаются на дне эффективной

потенциальной ямы. После пересечения волн эти траектории раскручиваются, удаляясь от фокуса. После вылета из эффективной потенциальной ямы амплитуда электрического поля волн становится ниже порогового значения (для реализации серфинга) и наблюдается циклотронное вращение частиц во внешнем магнитном поле.

Результаты численных расчетов

Пусть электромагнитная волна p -поляризации распространяется поперек внешнего магнитного поля H_0 . Рассмотрим сильнорелятивистское ускорение заряженных частиц (электронов) этой волной.

Механизм серфотронного ускорения связан с черенковским резонансом при взаимодействии волна-частица. Показатель преломления плазмы $N = ck / \omega$ на частоте волны ω определяется выражением $N^2 = \epsilon_{\perp} - (\epsilon_c^2 / \epsilon_{\perp}) = 1 - [v(1-v)] / (1-u^2-v)$, где k – волновой вектор. Здесь $\epsilon_{\perp}, \epsilon_c$ компоненты тензора диэлектрической проницаемости плазмы. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси z : $H_0 = H_0 e_z$. Захват в режим серфинга происходит для амплитуд волны выше некоторого порогового значения, т.е. для $\sigma > \sigma_c$, где $\sigma = eE / mc\omega$ и $\sigma_c = u\gamma_p = u / (1 - \beta_p^2)^{1/2}$, $\beta_p = \omega / kc$. Безразмерные параметры данной задачи: $\tau = \omega t$ – безразмерное время, $u = \omega_{He} / \omega, v = (\omega_{pe} / \omega)^2$, ω_{He} – гирочастота нерелятивистских электронов плазмы, $\omega_{pe} = (4\pi e^2 n_0 / m)^{1/2}$ – электронная ленгмюровская частота. При поперечном распространении волна p -поляризации имеет компоненты полей E_x, E_y, H_z . Пусть ω волнового спектра несущая частота $\omega_0 = \omega(k_0)$. Для лоренцовского спектра волн в пакете основная компонента электрического поля имеет вид:

$$E_x(x, t) = \left\{ E_m / \left[1 + \zeta^2 / L^2 \right] \right\} \cos(\omega_0 t - k_0 x),$$

где $\zeta = x - v_g(k_0)t, L = 1/k_p$ – полуширина локализованного волнового пакета, движущегося с групповой скоростью $v_g(k_0)$, которая обычно мала по сравнению с фазовой скоростью пакета на несущей частоте ω_0 / k_0 . Аналогичным образом находятся и другие компоненты полей пакета E_y, H_z . Характерное время пересечения захваченным зарядом волнового пакета имеет порядок $\delta t \sim 2L / v_p$ (или в безразмерном времени имеем $\delta \tau \sim 2Lk_0$). За это время центр волнового пакета сместится на расстояние $\delta x \sim 2L(v_g / v_p) \ll 2L$. Расчеты показали, что сильное (ультрарелятивистское) ускорение захваченных зарядов имеет место в случае достаточно большого времени удержания частиц пакетом в ускоряющей фазе поля, т.е. при $\tau_1 \geq (10^4 \div 10^6)$, когда $Lk_0 = \rho \geq (10^4 \div 10^6)$, и это обеспечивает ультрарелятивистское ускорение зарядов пространственно локализованным волновым пакетом.

Из численных расчетов следует, что можно пренебречь вихревыми компонентами волновых полей E_y, H_z и для фазы пакета на несущей частоте $\psi_0(\tau) = \omega_0 t - k_0 x$ использовать следующее нелинейное уравнение [12–13]

$$\gamma \beta_{po} d^2 \psi_0 / d\tau^2 - (1 - \beta_x^2) \cdot (eE_x / mc\omega_0) - u_0 \beta_y = 0, \tag{1}$$

где $\beta_{po} = \omega_0 / ck_0, \gamma = (1 + h^2 + r_0^2)^{0.5} / (1 - \beta_x^2)^{0.5}, r_0 = \gamma(0)\beta_y(0)$ – начальный импульс частицы вдоль волнового фронта и $J = \gamma \beta_{y,y} + u_0 \beta_{po}(\psi_0 - \tau)$ – интеграл движения. Имеется и второй интеграл движения $\gamma \beta_z = \text{const} \equiv h$. Кроме того, из формулы для фазы волнового пакета следует вы-

ражение для скорости частицы в направлении распространения пакета $\beta_x = \beta_{po} [1 - d\psi_0 / d\tau]$. Нелинейное, нестационарное дифференциальное уравнение второго порядка (1) решалось численно для следующих значений исходных параметров задачи $u = 0,31, \beta_{po} = 0,9, h = 0,88, r_0 = 0,49, \rho = 3,5 \cdot 10^4, \sigma = 1,3\sigma_c$.

Согласно численным расчетам при ускорении захваченной частицы ее релятивистский фактор и поперечные к внешнему магнитному полю компоненты импульса $\gamma\beta_y, \gamma\beta_x$ возрастают пропорционально времени удержания заряда волнами в эффективной потенциальной яме. В области волнового пакета, где амплитуда электрического поля выше порогового значения, а скорость заряда в направлении распространения волнового пакета соответствует реализации черенковского резонанса $\beta_x \approx \beta_{po}$, имеют место захват и последующее сильное ультрарелятивистское ускорение частиц локализованным волновым пакетом.

В качестве примера приведем результаты расчетов для следующего варианта выбора начальной фазы пакета на несущей частоте $\psi_c(0) = 2\pi \cdot 6879 + 2$ при слабoreлятивистской начальной энергии заряженной частицы, находящейся на задней стороне волнового пакета. Захват частицы в режим сильного серфотронного ускорения происходит сразу при данном значении начальной фазы.

Захват электронов в режим серфинга зависит от начальной фазы. В общем случае эта зависимость весьма немонотонная. Для большинства значений начальных фаз из интервала $|\psi(0) - \psi_c(0)| < 3,1$ захват частиц волной в режим ускорения происходит сразу или на сравнительно малых временах τ по сравнению со временем ультрарелятивистского ускорения $\tau_{ac} \sim 60\,000$, которое соответствует увеличению энергии частицы на 3 порядка. В указанном случае выбора начальной фазы максимальное значение релятивистского фактора ускоренного электрона $\gamma_{max} \approx 12\,832$. Поскольку захваченная частица смещается вместе с волной со скоростью $\beta_x \approx \beta_p$, координата $\zeta(\tau) = \omega_0 x / c$ возрастает практически пропорционально времени $\zeta(\tau) \approx \beta_p \cdot \tau$. Динамика фазы волнового пакета на несущей частоте на траектории частицы представлена на рис. 1.

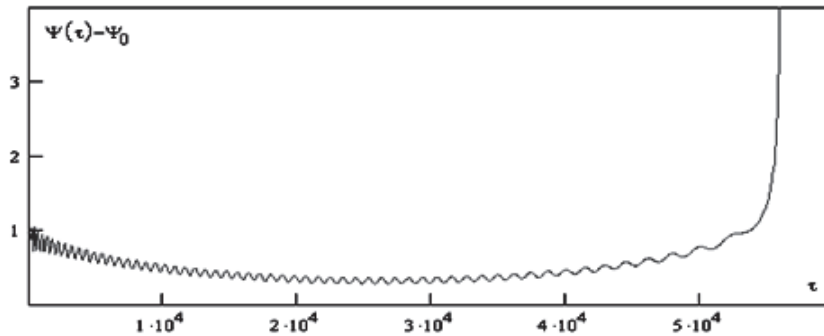


Рис. 1. График фазы пакета, когда частица сразу захватывается.

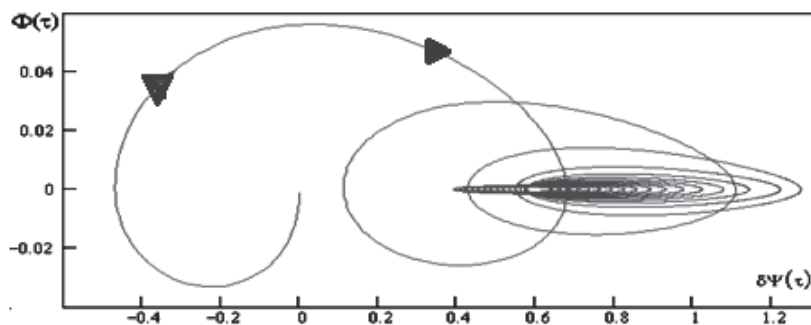


Рис. 2. Структура фазовой плоскости частицы на временном интервале $\tau < 60\,000$.

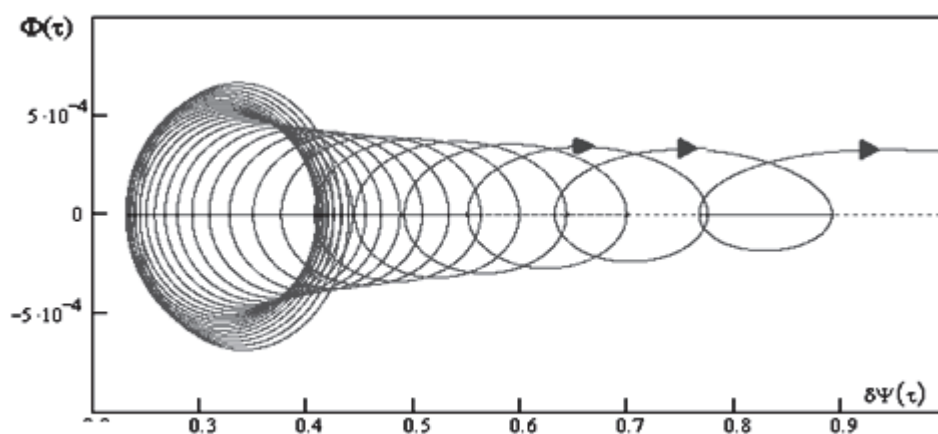


Рис. 3. Структура фазовой плоскости частицы для $25\,000 < \tau < 60\,000$.

Для захваченной частицы фаза колеблется в диапазоне ускоряющих полей волны. После пересечения центральной части пакета поле волны меньше порогового значения, частица становится пролетной и фаза пакета быстро нарастает, энергия частицы практически постоянна (рис. 1).

Структура фазовой плоскости частицы показана на рис. 2, где $\phi(\tau) = d\psi(\tau)/d\tau$ для интервала времени $\tau < 60\,000$, на котором частица является захваченной. Для больших времен потенциальная яма исчезает, ускорение прекращается и имеет место циклотронное вращение (рис. 3).

Заключение

Согласно расчетам при другом знаке компоненты импульса вдоль волнового фронта (отрицательном) динамика такова. Вначале у захваченной частицы компонента импульса $\gamma\beta_y$ и энергия частицы уменьшаются, скорость β_y меняет знак на положительное значение и далее происходит ускорение. Заметим, что отрицательное начальное значение $\gamma\beta_y$ не соответствует его асимптотике при серфинге частицы на электромагнитной волне. Расчеты показывают, что темп торможения частицы почти не меняется (практически постоянен). После изменения знака компоненты импульса $\gamma\beta_y$ происходит серфотронное ускорение частицы до больших энергий. Таким образом для максимального ускорения частиц оптимальным условием, кроме выполнения условия черенковского резонанса, является и положительный знак компоненты скорости частицы β_y в момент захвата частицы волной.

Пакеты электромагнитных волн в окрестностях относительно спокойных звезд (например, Солнца) могут быть локальными источниками доускорения части спектра космических лучей с начальными энергиями порядка ГэВ до энергий в сотни ГэВ и десятков ТэВ, что обеспечивает наблюдаемые вариации спектра космических лучей в этой области от зависимости от космической погоды. Гораздо большее доускорение космических лучей может быть в плазме местных межзвездных облаков на расстояниях от Солнца порядка парсек.

Анализ серфотронного механизма генерации потоков релятивистских заряженных частиц электромагнитными волнами в сравнительно спокойной космической плазме важен для понимания причин наблюдаемой переменности энергетических спектров КЛ и появления разнообразных особенностей в их энергетическом спектре. Это позволит дать корректную интерпретацию экспериментальных данных. Важно отметить, что потоки КЛ могут существенно влиять на вертикальные профили температуры атмосферы, выпадение осадков и динамику крупномасштабного тропического циклогенеза.

Литература

1. Заславский, Г.М. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса / Г.М. Заславский, Р.З. Сагдеев. – М.: Наука, 1988. – 368 с.
2. Katsouleas N. / N. Katsouleas, J.M. Dawson // *Physical Review Letters*. – 1983. – V. 51, № 5. – P. 392.
3. Ситнов, М.И. Максимальная энергия частиц в серфотроне в режиме «неограниченного ускорения» / М.И. Ситнов // *Письма в ЖТФ*. – 1988. – Т. 14. – Вып. 1. – С. 89.
4. Кичигин, Г.Н. Особенности ускорения электронов в серфотроне / Г.Н. Кичигин // *ЖЭТФ*. – 1995. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 1342–1354.
5. Joshi, C. The surfatron laser-plasma accelerator: Prospects and limitations/ C. Joshi // *Radiation in plasmas: сб. науч. тр.* – 1984. – Vol. 1. – P. 514–527.
6. Ерохин, Н.С. / Н.С. Ерохин, С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев // *Письма в Астрономический журнал*. – 1989. – Т. 15, № 1. – С. 3–10.
7. Увлечение и ускорение заряженных частиц замедленной волной в неоднородной плазме // Н.С. Ерохин, А.А. Лазарев, С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев // *ДАН СССР*. – 1987. – Т. 295, № 4. – С. 849–852.
8. Ерохин, Н.С. Релятивистский серфинг в неоднородной плазме и генерация космических лучей / Н.С. Ерохин, С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев // *Письма в Астрономический журнал*. – 1989. – Т. 15, № 1. – С. 3–10.
9. Ерохин, Н.С. Ускорение зарядов поперек магнитного поля при взаимодействии сильной плазменной волны с многокомпонентными потоками релятивистских частиц / Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, А.Г. Хачатрян // *Физика плазмы*. – 1990. – Т. 16, Вып. 8. – С. 945–947.
10. Кичигин, Г.Н. Серфотронный механизм ускорения космических лучей в галактической плазме // Г.Н. Кичигин. – *ЖЭТФ*. – 2001. Т. 119, вып. 6. – С. 1038–1049.
11. Лозников, В.М. Переменный источник избытка космических электронов в гелиосфере / В.М. Лозников, Н.С. Ерохин // *Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника*. – 2010. – № 4 (68). – С. 121–124.
12. Динамика релятивистского ускорения заряженных частиц в космической плазме при серфинге на пакете электромагнитных волн / Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, Е.А. Кузнецов, Л.А. Михайловская // *Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника*. – 2010. – № 4(68). – С. 116–120.
13. Ерохин, Н.С. Особенности захвата и серфотронного ускорения ультрарелятивистских частиц в космической плазме в присутствии попутной волны / Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2008. – № 4. – С. 114–118.
14. Chernikov, A.A. Unlimited Particle Acceleration by Waves in a Magnetic Field / A.A. Chernikov, G. Schmidt, A.I. Neishtadt // *Physical Review Letters*. – 1992. – V. 68, № 10. – P. 1507–1510.

Поступила в редакцию 30 октября 2015 г.

DYNAMICS OF CAPTURE AND SUBSEQUENT SURFATRON ACCELERATION OF ELECTRONS BY ELECTROMAGNETIC WAVES IN COSMIC PLASMA**G.S. Mkrtichyan***People's Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation**E-mail: hay-13@mail.ru*

The research of dynamics of the capture and subsequent surfatron acceleration of electrons by electromagnetic waves, propagating perpendicular to the magnetic field in cosmic plasma is conducted on the basis of nonlinear numerical calculations. The optimal conditions for the realization of ultra-relativistic electron acceleration by wave packets in cosmic plasma including favorable initial phase of the wave on the particle trajectory, the sign of electron initial impulse in the direction of the wave front, the magnitude of the phase velocity of the wave are formulated. The asymptotic behavior of the electron characteristics under hard acceleration (relativistic factor, the impulse components and the captured particle velocity, position of the bottom of the effective potential well, etc.) is obtained. It is shown that the trajectories have the form of a spiral on the phase plane for trapped electrons and gradually approach the singular point of the type of stable focus. The bottom position of effective non-stationary potential well for the trapped electrons is different because it depends on the charge sign of the accelerated particle. For trapped electrons the wave phase graphics on the particle trajectory correspond to oscillations with an increasing period and decreasing amplitude with the increase of energy of the particle. The bottom of an effective non-stationary potential well is achieved by trapped particle asymptotically. Thus, the trapped electrons with different initial wave phases in their trajectory are gradually condensed on the bottom of the effective non-stationary potential well.

It is important to emphasize that the packets of electromagnetic waves in the vicinity of relatively quiet stars (like the Sun) can be local sources of additional acceleration of the spectrum of cosmic rays with initial energies of the order of GeV up to the energies of hundreds of GeV and a dozen of TeV, which provides the observed variation of the spectrum of cosmic rays in this area depending on the space weather. Much more additional acceleration of cosmic rays can be in the plasma of local interstellar clouds at distances from the Sun of about parsecs.

The analysis of surfatron generation mechanism of relativistic particles charged with electromagnetic waves in the relatively tranquil cosmic plasma is important for understanding the causes of the observed variability of the energy spectra of cosmic rays and the appearance of various features in their energy spectrum. This allows giving a correct interpretation of the experimental data. It is important to note that the flows of cosmic rays can significantly affect the vertical profiles of atmospheric temperature, precipitation, and the dynamics of large-scale tropical cyclogenesis.

Keywords: capture; Cherenkov resonance; trajectories of charged particles; phase plane structure; stable focus; potential well; surfing of charged particles; cosmic plasma.

References

1. Zaslavsky G.M., Sagdeev R.Z. *Vvedenie v nelineynuyu fiziku: ot mayatnika do turbulentsnosti i khaosa* [Introduction to nonlinear physics: from the pendulum to turbulence and chaos], Moscow: Nauka Publ., 1988, 368 p.
2. Katsouleas N., Dawson J.M. *Physical Review Letters*, 1983, Vol. 51, no. 5, p. 392. DOI: 10.1103/physrevlett.51.392
3. Sitnov M.I. *Technical Physics Letters*, 1988, Vol. 14, Issue 1, p. 89. (in Russ.).
4. Kichigin G.N. *JETP*, 1995, Vol. 81, no. 4, p. 736.
5. Joshi C. The surfatron laser-plasma accelerator: Prospects and limitations. *Radiation in plasmas*, 1984, Vol. 1, pp. 514–527.

6. Erokhin N.S., Moiseev S.S., Sagdeev R.Z. *Pis'ma v Astronomicheskij zhurnal* [Letters to the Astronomical Journal], 1989, Vol. 15, no. 1, pp. 3–10. (in Russ.).

7. Erokhin N.S., Lazarev A.A., Moiseev S.S., Sagdeev R.Z. *DAN SSSR*, 1987, Vol. 295, no. 4, pp. 849–852. (in Russ.).

8. Erokhin N.S., Moiseev S.S., Sagdeev R.Z. Relyativistskiy serfing v neodnorodnoy plazme i generatsiya kosmicheskikh luchey [Relativistic surfing in inhomogeneous plasma and the generation of cosmic rays]. *Pis'ma v Astronomicheskij zhurnal* [Letters to the Astronomical Journal], 1989, Vol. 15, no. 1, pp. 3–10. (in Russ.).

9. Erokhin N.S., Zolnikova N.N., Khachatryan A.G. Uskorenie zaryadov poperek magnitnogo polya pri vzaimodeystvii sil'noy plazmennoy volny s mnogokomponentnymi potokami relyativistskikh chastits [Acceleration of charges across the magnetic field in the interaction of plasma waves with strong multi-component stream of relativistic particles]. *Fizika plazmy* [Plasma Physics], 1990, Vol. 16, Issue 8, pp. 945–947. (in Russ.).

10. Kichigin G.N. The surfatron acceleration of cosmic rays in the galactic plasma. *JETP*, 2001, Vol. 92, no 6, p. 895–904. DOI: 10.1134/1.1385629

11. Loznikov V.M., Erokhin N.S. Peremennyy istochnik izbytko kosmicheskikh elektronov v geliosfere [The variable source of cosmic excess electrons in the heliosphere]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki, ser. Plazmennaya elektronika* [Problems of Atomic Science and Technology, Ser. Plasma electronics], 2010, no. 4(68), pp. 121–124. (in Russ.).

12. Erokhin N.S., Zolnikova N.N., Kuznezov E.A., Mihaylovskaya L.A. Dinamika relyativistskogo uskoreniya zaryazhennykh chastits v kosmicheskoy plazme pri serfinge na pakete elektromagnitnykh voln [The dynamics of a relativistic charged particle acceleration in space plasma when surfing on a packet of electromagnetic waves]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki, ser. Plazmennaya elektronika* [Problems of Atomic Science and Technology, Ser. Plasma electronics], 2010, no. 4(68), pp.116–120. (in Russ.).

13. Erokhin N.S., Zolnikova N.N., Mihaylovskaya L.A. Osobennosti zakhvata i serfotronnogo uskoreniya ul'trarelyativistskikh chastits v kosmicheskoy plazme v prisutstvii poputnoy volny [Features of the capture and serfotronnogo acceleration of relativistic particles in the cosmic plasma in the presence of a passing wave]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology], 2008, no. 4, pp. 114–118. (in Russ.).

14. Chernikov A.A., Schmidt G., Neishtadt A.I. Unlimited Particle Acceleration by Waves in a Magnetic Field. *Physical Review Letters*, 1992, Vol. 68, no. 10, pp. 1507–1510. DOI: 10.1103/PhysRevLett.68.1507

Received October 30, 2015