

Институт космических исследований Российской академии наук

7. О сотрудничестве с болгарскими и польскими учеными и специалистами в области фундаментальных космических исследований

7.1 Российско-болгарское сотрудничество: проект «Магнитоплазма» – изучение процессов формирования магнитосферных плазменных конфигураций по данным проекта ИНТЕРБОЛ и CLUSTER

Цели проекта в 2011 – 2015годах:

1. изучение пространственной структуры и динамики продольных электрических токов в Пограничном Плазменном Слое (ППС) геомагнитного хвоста по наблюдениям многоспутниковой миссии CLUSTER;
2. исследование роли продольных электрических токов, создаваемых ускоренными ионными пучками в ППС хвоста, в магнитосферно-ионосферном взаимодействии;
3. разработка алгоритма автоматического (без визуального анализа) поиска области ППС по спутниковым данным;
4. исследование структуры Токового Слоя (ТС) и динамики ионов вблизи области магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы;
5. исследование структуры и устойчивости ТС в ближних областях геомагнитного хвоста ($X > -10 R_e$, где R_e - радиус Земли) в периоды прихода к Земле высокоскоростных плазменных потоков.

Установление связи между явлениями ослабления/разрушения тока в ТС ближнего хвоста и геомагнитной активностью.

Основные научные результаты, полученные за период 2011-2015 годах:

1. Установлено, что пучки ионов, ускоренные в ТС дальних областях хвоста за счет резонансного неадиабатического взаимодействия ионов с ТС (так называемые пучки I типа, *Grigorenko et al., 2012*) не создают в ППС хвоста значительных продольных электрических токов. Плотность продольных токов в такие периоды не превышает 2 нА/м^2 . Такие пучки проецируются на высокоширотную границу квазистационарной арки. При этом признаки авроральной активности отсутствуют (Рис. 1).
2. Установлено, что пучки ионов, ускоренные в ТС хвоста вблизи области магнитного пересоединения (так называемые пучки II типа, *Grigorenko et al., 2012*) создают в ППС хвоста значительные продольные электрические токи. Плотность продольных токов в ППС в такие периоды превышает 5 нА/м^2 . Поперечный размер этих токов сопоставим с размером ППС и составляет $\sim 1 R_e$. Такие пучки проецируются вблизи полярной границы дискретной арочной структуры или псевдобрейкапа (Рис. 2).

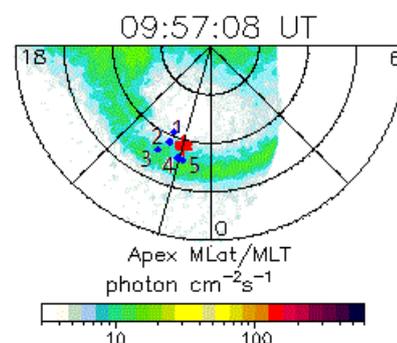
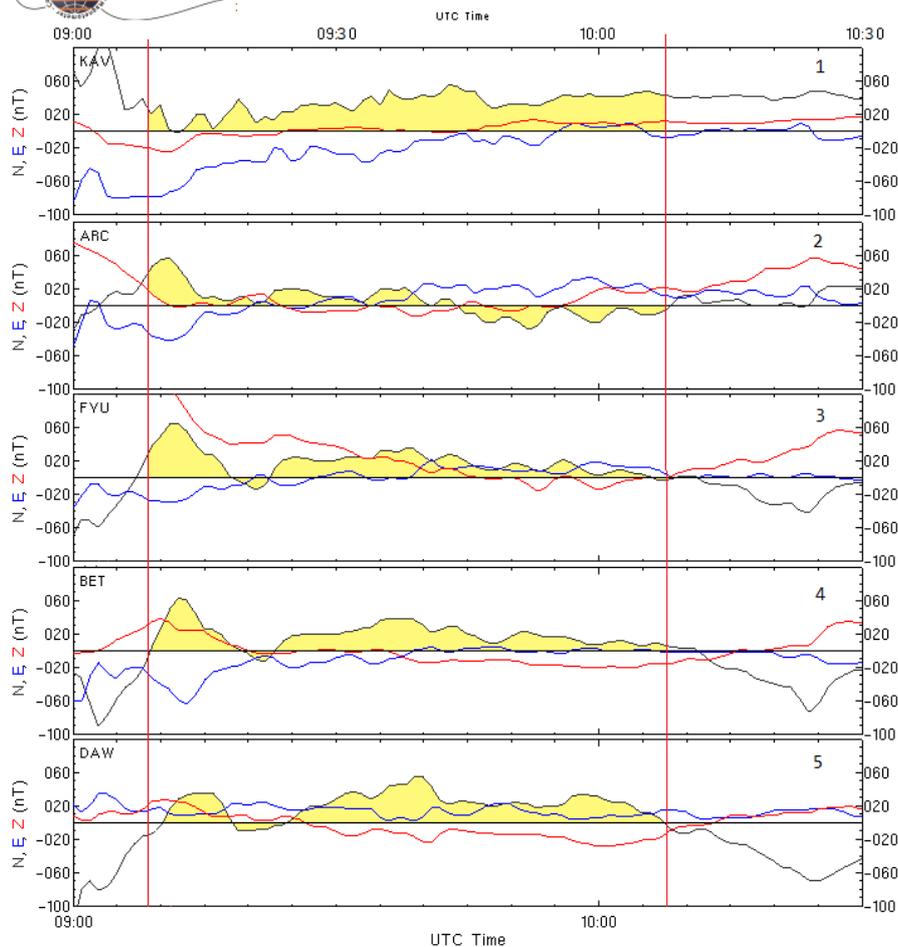


Рис.1. Слева: вариации геомагнитного поля, измеренные наземными станциями, находящимися вблизи ионосферной проекции спутников CLUSTER в период наблюдения в ППС хвоста квазистационарного пучка ускоренных ионов I типа. Интервал наблюдения ионного пучка выделен вертикальными красными линиями. Справа: УФ изображение аврорального свечения (интенсивность которого показана цветом согласно шкале под рисунком), наблюдаемого в момент прохождения в ППС хвоста квазистационарного пучка ускоренных ионов I типа. Синими кружками и цифрами показаны наземные станции, данные с которых представлены в левой части рисунка. Красным крестиком показана ионосферная проекция спутников CLUSTER.

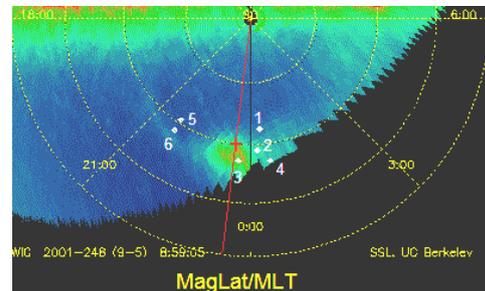
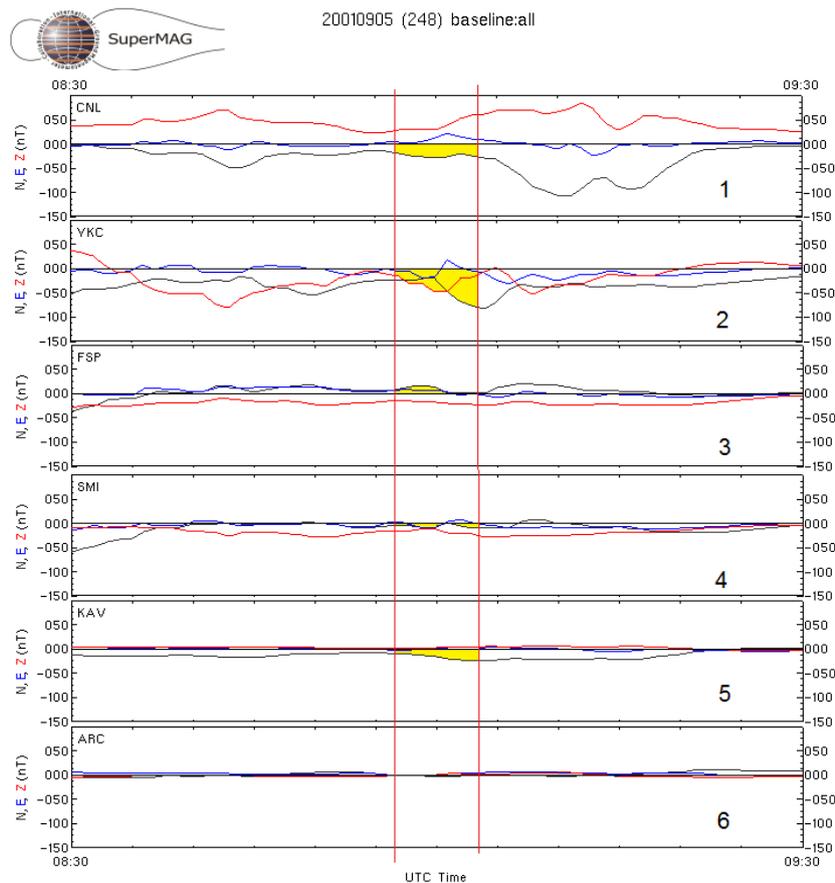


Рис.2. Слева: вариации геомагнитного поля, измеренные наземными станциями, находящимися вблизи ионосферной проекции спутников CLUSTER в период наблюдения в ППС хвоста пучка ускоренных ионов II типа. Интервал наблюдения ионного пучка выделен вертикальными красными линиями. Справа: УФ изображение аврорального свечения, наблюдаемого в момент прохождения в ППС хвоста пучка ускоренных ионов II типа. Белыми кружками и цифрами показаны наземные станции, данные с которых представлены в левой части рисунка. Красным крестиком показана ионосферная проекция спутников CLUSTER.

1. Разработан алгоритм автоматического (без визуального анализа) поиска области ППС по спутниковым данным. Показано, что использование плазменного β и направленной скорости ионов в качестве параметров автоматического поиска ППС (как предлагалось в ранних работах) приводит к большой ($\geq 50\%$) ошибке в идентификации

ППС. Мы предложили использовать в качестве параметра поиска следующий критерий: $V_{i||} > 400$ км/с, где $V_{i||}$ - скорость ионов с энергиями 2 - 35 кэВ вдоль магнитного поля. Использование данного критерия позволяет идентифицировать интервалы пересечения спутником ППС с ошибкой менее 30% (*Grigorenko et al., 2012*).

2. Исследована структура ТС и динамика ионов вблизи области магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы по данным спутников CLUSTER и Double Star. Спутники одновременно наблюдали магнитное пересоединение в ТС ближнего хвоста находясь по обе стороны от магнитной X-линии. Показано, что в непосредственной близости от области пересоединения в Плазменном Слое (ПС) хвоста возникает квадрупольное распределение сдвиговой компоненты магнитного поля B_y за счет формирования холловской токовой системы. С хвостовой стороны от X-линии формируется замкнутая магнитная конфигурация (плазмоид) в нейтральной плоскости которого наблюдается усиление поля B_y . Нами установлен механизм усиления поля B_y за счет асимметрии в отражении/преломлении траекторий неадиабатических ионов в направлении нормали к ТС (Рис.3). Возникающая в результате данных кинетических эффектов токовая система способствует усилению поля B_y , обеспечивающих замагничивание ионов и прекращение действия кинетических эффектов (*Grigorenko et al., 2013*). Данный механизм демонстрирует как плазменные эффекты, проявляющиеся на кинетических масштабах, влияют на крупномасштабную конфигурацию магнитоплазменной системы.

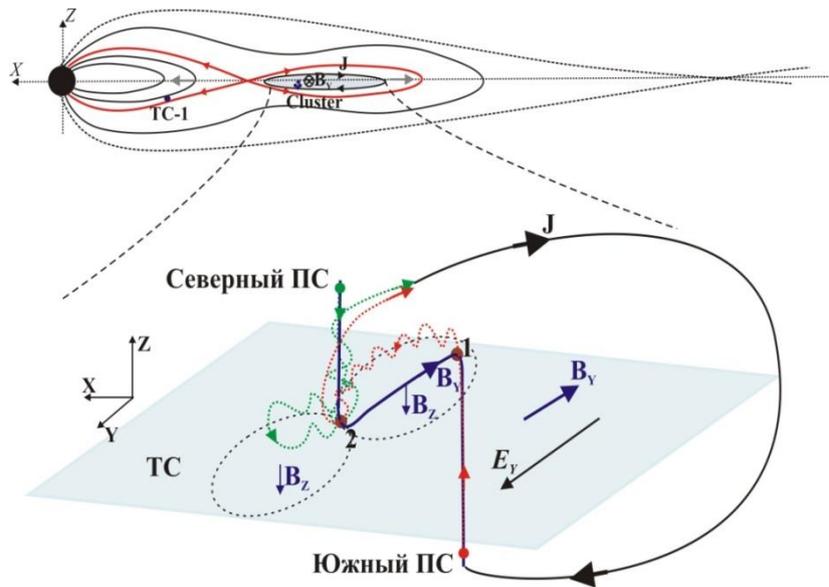


Рис.3. Усиление сдвигового магнитного поля B_y в ТС хвоста (показан голубым цветом) за счет формирования в ПС токовой петли J . В результате частичного замагничивания полем B_y ионы, приходящие из северной доли (показаны зеленым цветом) после взаимодействия с ТС инжектируются назад в северный ПС. Ионы, приходящие из южной доли (показаны красным цветом), также инжектируются в северный ПС. В результате возникает асимметрия север-юг в инжекции неадиабатических ионов. Такие ионы создают токовую петлю J вокруг плазмоида внутри которой поле B_y усиливается.

3. На основе пяти спутниковых наблюдений CLUSTER и THEMIS исследована «тонкая» структура (на масштабах $\leq \rho_i$, где ρ_i - гирорадиус тепловых протонов) ТС ближнего хвоста ($X > -10 R_e$) и установлено наличие мелкомасштабной филаментации ТС и ослабление (разрушение) тока, сопровождавшееся сильным нагревом электронов. Данные наблюдения указывают на то, что разрушение/ослабление поперечного тока хвоста произошло в результате формирования области аномального сопротивления. Одновременно с началом формирования данной области на наземных станциях, расположенных вблизи ионосферной проекции спутника THEMIS-P3 наблюдалось уменьшение горизонтальной компоненты геомагнитного поля B_H ,

свидетельствующее о формировании суббуревой токовой системы. Таким образом, установлена связь между процессом разрушения поперечного тока в ближнем хвосте и геомагнитной активностью (Grigorenko et al., 2016).

Руководители проекта

со стороны РАН:

внс д.ф.-м.н. Григоренко Елена Евгеньевна

elenagrigenko2003@yandex.ru

со стороны БАН:

ст.н.с. II ст. д-р Колева Росица

rkoleva@stil.bas.bg

Список публикаций:

1. E.E. Grigorenko, R. Koleva, J.-A. Sauvaud, On the problem of Plasma Sheet Boundary Layer identification from plasma moments in Earth's magnetotail, *Annales Geophysicae*, 30, 1331–1343, 2012, <http://www.ann-geophys.net/30/1331/2012/angeo-30-1331-2012>.
2. E.E. Grigorenko et al., Non-adiabatic ion acceleration in the Earth magnetotail and its various manifestations in the Plasma Sheet Boundary Layer, *Space Sci. Rev.*, 164, N 1, 133-181, 2012.
3. E. E. Grigorenko, H. V. Malova, A. V. Artemyev O. V. Mingalev E. A. Kronberg, R. Koleva, P. W. Daly, J. B. Cao, J.-A. Sauvaud, C. J. Owen, and L. M. Zelenyi, Current sheet structure and kinetic properties of plasma flows

- during a near-Earth magnetic reconnection under the presence of a guide field, *J. Geophys. Res.*, 118, 3265–3287, doi:10.1002/jgra.50310, 2013.
4. E.E. Grigorenko, R. Koleva, E.A. Kronberg, P.W. Daly, Yu. Khotyaintsev, S. Dubyagin, L.M. Zelenyi, Particle dynamics and small-scale structure of the magnetic dipolarization observed in the near-Earth tail by Cluster and THEMIS spacecraft, *Planetary and Space Sci.*, 2016 (in press).

Список тезисов:

1. Grigorenko E.E., Koleva R, Zelenyi L.M., Sauvaud J.-A., PSBL plasma structure during different periods of geomagnetic activity observed by Cluster spacecraft and ground station network, International Workshop “Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere, Созопол, Болгария, 6-10 июня, 2011.
2. Koleva R., E. Grigorenko, Discrete Structures in the Magnetotail Lobes, paper # 3499, IUGG 2011, Melbourne, Australia, 28 June-7 July 2011, Detailed Scientific Program, p.262, http://www.iugg2011.com/pdf/IUGG2011_FinalEntireProgram.6June.pdf
3. Koleva R., E. E. Grigorenko, L. M. Zelenyi, J.-A. Sauvaud., PSBL Plasma Structures during Different Periods of Geomagnetic Activity and Their Possible Ground Manifestations, International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun–Earth System II, Borovets, Bulgaria, September 11–16, 2011, Abstract Book, p. 46, http://www.isroses.lanl.gov/abstract_book.pdf
4. Grigorenko et al., Different regimes of particle acceleration in the Earth magnetotail and their PSBL manifestations, CLUSTER 21th Workshop and ESLAB 2011 “Solar System Plasma Physics: Remote and in-situ Measurements”, Брюгге, Бельгия, 19-23 сентября, 2011
5. Koleva, R., Grigorenko, E. E., Zelenyi, L.M., Sauvaud, J.-A., Field-aligned currents in PSBL and their possible auroral and ground manifestations, paper D3.2-0016-12, presented at the 39th COSPAR Scientific Assembly, 14 - 22 July 2012, Mysore, India, <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-12/abstracts/D3.2-0016-12.pdf>
6. Grigorenko, E., Zelenyi, L., Sauvaud, J.-A., Koleva, R., Effects of near-Earth magnetic reconnection simultaneously observed in the Plasma Sheet by Cluster and DSP spacecrafts, Paper D3.2-0015-12, presented at the 39th COSPAR Scientific Assembly, 14 - 22 July 2012, Mysore, India, <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-12/abstracts/D3.2-0015-12.pdf>

7. Koleva, R., Grigorenko, E. E., Zelenyi, L.M., Sauvaud, J.-A., PSBL field-aligned beams and currents, and their auroral and ground manifestations, paper presented at the 9th International Conference "Problems of Geocosmos", St. Petersburg, Petrodvorets, October 8 - 12, 2012, Book of Abstracts, p. 183.
8. Koleva, R, Grigorenko, E. E., Zelenyi, L. M, Sauvaud, J.-A., Auroral and Ground Manifestations of PSBL Field-Aligned Plasma Structures, paper EGU2013-4613, presented at EGU General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-PREVIEW, 2013
9. Grigorenko E.E., Malova H.V., Koleva R., Kronberg E., Sauvaud J.-A., Zelenyi L.M.. A possible mechanism of a strong guide By field formation in a thin Current Sheet of the Earth magnetotail, paper presented at the Fifth Workshop "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere", Nesebar, Bulgaria, 1-7 June 2013, http://ws-sozopol.stil.bas.bg/2013Nesebar/Grigorenko_oral.pdf.
10. Koleva R., Grigorenko E. E., Zelenyi L. M., Sauvaud, J.-A., Auroral and Ground Manifestation of Different Ion Acceleration Mechanisms Operating in PSBL, paper presented at the Fifth Workshop "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere", Nesebar, Bulgaria, 1-7 June 2013, http://ws-sozopol.stil.bas.bg/2013Nesebar/Koleva_oral.pdf.
11. Koleva R., Grigorenko E. E., Zelenyi L. M., Sauvaud, J.-A., Ion Beams in PSBL and Their Auroral and Ground Manifestations, paper presented at the 12th Scientific Assembly of the IAGA Merida, Mexico, 25-31 August 2013
12. Koleva R., Grigorenko E. E., PSBL Plasma Structures Related to Auroras, paper at the Ninth Scientific Conference with International Participation SES 2013, Sofia, 20-22 November 2013.
13. Koleva R., Grigorenko E. E., Zelenyi L.M., Sauvaud J.-A., PSBL filed-aligned plasma structures related to auroras, paper D3.2-0023-14 presented at the 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, 02 - 10 August 2014.
14. Grigorenko E.E., Koleva R., L. Palin, Sauvaud J.-A., Zelenyi L.M.. Current sheet dynamics in the near-Earth magnetotail and its relation to geomagnetic activity, SES 2014, Sofia, 12-14 November 2014.
15. Koleva R., Grigorenko E. E., Auroral display of PSBL field-aligned currents, SES 2014, Sofia, 12-14 November 2014.
16. Grigorenko E.E. et al., Cluster advances in studies of ion beams in the Earth's magnetotail, invited paper presented at Cluster 25th workshop, Cluster 25th workshop, 12-16 October 2015, Venice, Italy.
17. Koleva R., Grigorenko E. E., Criteria for Earth's magnetotail Plasma Sheet Boundary Layer Identification from Spacecraft Data, SES 2015, Sofia, 4-6 November 2015.

7.2 Российско-болгарское сотрудничество: проект «Серфотрон» – серфотронное ускорение релятивистских заряженных частиц пакетами электромагнитных волн в космической плазме

Цели и задачи проекта «Серфотрон»

Целью данного проекта был анализ на основе численных расчетов ультрарелятивистского серфотронного ускорения заряженных частиц электромагнитными волнами в космической плазме, исследование малопараметрической нелинейной модели крупномасштабного циклогенеза, анализ движения экваториального спутника на круговой орбите с решением следующих основных задач.

1. Исследование благоприятных условий для реализации ультрарелятивистского серфотронного ускорения заряженных частиц волнами и локализованными волновыми пакетами в космической плазме.
2. Численный анализ динамики слаборелятивистских частиц с учетом их гировращения на начальном этапе с последующим захватом волной в эффективную потенциальную яму и ультрарелятивистским серфотронным ускорением.
3. Численный анализ особенностей траекторий частиц при серфинге на пакете электромагнитных волн, зависимости ускорения от фазовой скорости волны.
4. Исследование траекторий частиц на фазовой плоскости при серфинге на пакете электромагнитных волн в космической плазме.
5. Анализ серфотронного ускорения тяжелых частиц - протонов, ядер гелия и железа электромагнитной волной в космической плазме.

6. Анализ возникновения локальных максимумов в потоке космических лучей за счет серфинга частиц на электромагнитных волнах в гелиосфере и окрестностях других спокойных звезд.
7. Анализ малопараметрической модели регионального крупномасштабного циклогенеза с вариациями скорости ветра в тайфунах.
8. Исследование устойчивости движения экваториального спутника на круговой орбите под действием гравитационного потенциала, определение орбитальных параметров спутника для устойчивого движения.

Результаты выполненных исследований по данному проекту состоят в следующем:

1. На основе численных расчетов исследованы захват и ультрарелятивистское ускорение заряженных частиц в магнитоактивной плазме при их взаимодействии с пространственно локализованным волновым пакетом, имеющим лоренцовскую огибающую амплитуды электрического поля. Волновой пакет распространялся поперек внешнего магнитного поля. Рассмотрена зависимость ускорения от начальных данных. При неблагоприятной начальной фазе пакета на несущей частоте и для слаборелятивистских электронов их захват в режим серфинга происходит для весьма широкого диапазона начальных условий поскольку начальный циклотронный период частицы относительно мал и электрон после ряда гирооборотов попадает в благоприятную для захвата волной фазу в момент черенковского резонанса. Затем следует сильное ускорение с ростом энергии на 3÷4 порядка величины и более, если время, когда происходит захват, не слишком

велико. При этом число ускоренных волновым пакетом частиц может быть достаточно большим вследствие резкого увеличения в пространстве начальных импульсов области, из которой заряды попадают в режим эффективного серфотронного ускорения. Показано, что во время сильного ускорения компоненты импульса и релятивистский фактор захваченной частицы возрастают практически с постоянным темпом (типичный график релятивистского фактора $\gamma(\tau)$, представлен на рис.1). При отсутствии захвата происходит циклотронное вращение частиц, но тем не менее в этом процессе возможно доускорение частиц с увеличением их энергии, например, на порядок.

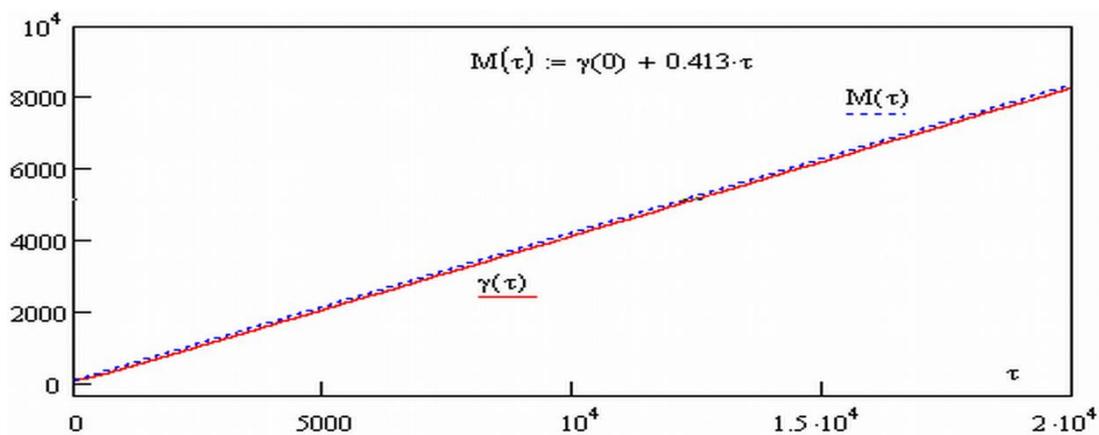


Рис. 1. График релятивистского фактора $\gamma(\tau)$ и его аналитической аппроксимации $M(\tau)$ для захваченного волновым пакетом электрона с $\gamma(0) = 117.05$

2. Согласно проведенным расчетам для реализации оптимального серфинга зарядов с ультрарелятивистским ускорением необходимо выполнить следующие условия: а) для захвата частицы волной ее амплитуда должна быть выше порогового значения; б) должен реализоваться черенковский резонанс волна-частица; в) фаза волны на траектории заряда должна быть благоприятной для захвата частиц;

г) знак начального импульса частицы вдоль волнового фронта должен быть благоприятным.

3. Зависимость эффективности ускорения частиц от величины фазовой скорости волны такова. При выборе релятивистских значений фазовой скорости волны наибольшее ускорение идет по направлению распространения волны, темп ускорения частиц наибольший, при заданной толщине пакета энергия ускоренных частиц максимальна. В обратном случае – низких значений фазовой скорости основное ускорение происходит вдоль волнового фронта, а темп ускорения значительно снижается, например, на порядок. При заданной полуширине волнового пакета это означает существенное уменьшение максимальной энергии ускоренных зарядов.
4. Генерация потоков ультрарелятивистских заряженных частиц в космической плазме характеризуется большой (в масштабе периода волны) длительностью взаимодействия и, соответственно, будут весьма высокие энергии ускоренных частиц. Согласно проведенным оценкам в солнечной гелиосфере характерные энергии при серфотронном ускорении зарядов могут достигать от десятков ГэВ до ТэВ, а в местных межзвездных облаках порядка 10^{15} эВ и более. Благодаря серфингу зарядов на электромагнитных волнах в относительно спокойных условиях космической плазмы возможна генерация потоков ультрарелятивистских заряженных частиц и возникновение особенностей в их энергетических спектрах (существенные отклонения от стандартных степенных зависимостей).
5. Для захваченных частиц (электронов, позитронов, протонов, ядер гелия, железа) их траектории в плоскости, перпендикулярной внешнему магнитному полю, являются практически прямыми

линиями (типичный график дан на рис.2), структура фазовой плоскости решения нелинейного уравнения для фазы волны или пакета на несущей частоте имеет особую точку типа устойчивый фокус. На основе численных расчетов разработаны аналитические аппроксимации характеристик ускоряемых частиц. При сильном ускорении поперечные компоненты скорости заряда выходят на асимптотические значения, а компонента скорости вдоль внешнего магнитного поля стремится к нулю. Для тяжелых частиц (протоны, ядра гелия, железа) структура области начальных фаз, благоприятных для реализации серфотронного ускорения электромагнитными волнами в космической плазме, существенно упрощается.

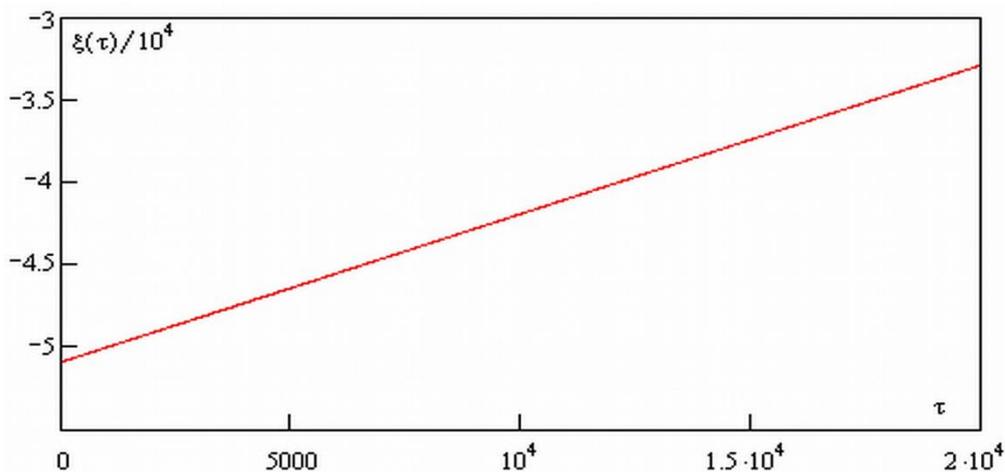


Рис. 2. Смещение захваченного электрона в направлении распространения пакета

$\xi = \omega x / c$. График практически является прямой линией т.е. скорость частицы $\beta_x \approx \beta_p$.

На основе численного анализа нелинейного дифференциального уравнения второго порядка для фазы волнового пакета (на несущей частоте) на траектории частицы рассмотрены особенности динамики сильного серфотронного заряженных частиц включая следующее:

- Исследовано влияние фазовой и групповой скоростей на несущей частоте волнового пакета на эффективность ускорения.

- Определены оптимальные условия, при которых слаборелятивистские частицы могут быть захвачены и ускорены пакетом электромагнитных волн до сильно релятивистских скоростей за счет серфотронного механизма ускорения заряда.
- Проведен анализ темпа нарастания энергии ускоряемой частицы в режиме серфотронного ускорения, исследована временная динамика ускорения частицы.
- Сделаны выводы о возможности реализации ультрарелятивистского серфотронного ускорения зарядов пакетом электромагнитных волн с плавной огибающей амплитуды поля.
- Показано, что для слаборелятивистских частиц, в случае наличия диапазона неблагоприятных начальных фаз волнового пакета и при невыполнении в начальный момент черенковского резонанса, на относительно малых временах возможен захват частиц с последующим ультра-релятивистским ускорением
- Установлено, что характерные времена захвата частиц в режиме серфотронного ускорения относительно малы по сравнению с оптимальным вариантом реализации серфинга (при их захвате в начальный момент времени) т.е. энергии частиц различаются приблизительно на 10 %.
- В неоптимальном случае для заряженных частиц вначале происходит циклотронное вращение во внешнем магнитном поле с последующим захватом частицы в режиме серфотронного ускорения. Следовательно для слаборелятивистских (по начальным энергиям частиц), область захвата оказывается достаточно большой, в отличие от ранее исследованных вариантов.

- Рассмотрена временная динамика компонент импульса, скорости ускоряемых частиц, с учетом их начальных параметров и возможности циклотронного вращения на начальном этапе взаимодействия с волнами.
- При сильном ускорении поперечные компоненты скорости заряда выходят на асимптотики, а продольная (относительно внешнего магнитного поля) компонента скорости стремится к нулю вследствие сохранения продольного импульса.
- Построены типичные для серфотронного ускорения графики структуры фазовой плоскости исследованного нелинейного дифференциального уравнения. Характерная структура фазовой плоскости дана на рис.3.

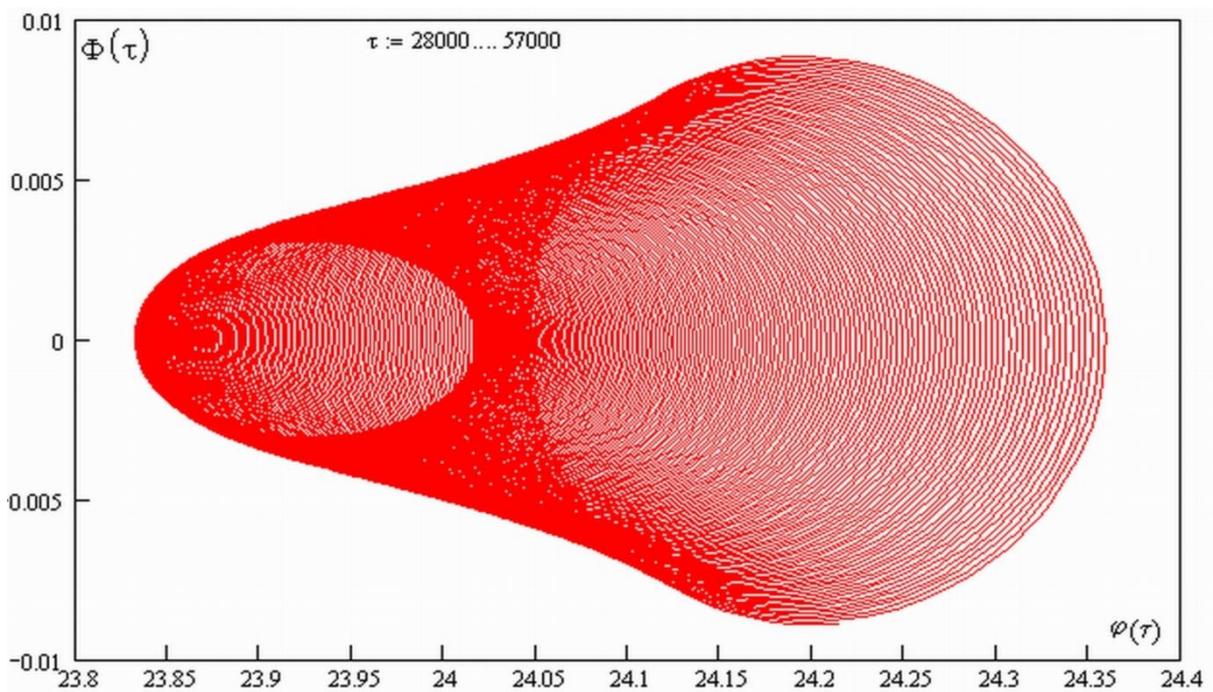


Рис.3. Структура фазовой плоскости $[\Phi(\tau), \phi(\tau)]$, показывающая наличие особой точки траектории захваченной частицы типа устойчивый фокус, где $\Phi(\tau) = d\phi(\tau) / d\tau$.

6. Полученные результаты представляют интерес для развития современных представлений о возможных механизмах генерации потоков

ультрарелятивистских частиц в космической плазме, возникновения в зависимости от космической погоды значительных вариаций энергетического спектра космических лучей (КЛ), а также для корректной интерпретации экспериментальных данных по измеряемым потокам КЛ.

7. В рамках малопараметрической модели численными расчетами нелинейной динамики регионального крупномасштабного тропического циклогенеза (РКТЦ) показано, что можно достаточно реалистично исследовать особенности сезонного хода временной динамики РКТЦ в период активного сезона. Данная модель при соответствующем выборе исходных параметров задачи и внешних воздействий вполне пригодна для описания сезонного хода интенсивности РКТЦ с любым, наперед заданным числом тайфунов причем интенсивности вихрей, продолжительность их существования, температура поверхности океана в зоне ТЦ могут быть различны, а максимальная скорость ветра и температура поверхности океана в заданном ТЦ могут иметь вариации различной длительности. Кроме того, на основе обобщения модели можно изучать зависимость РКТЦ от различных внешних факторов, например, вариаций солнечной активности, явления Эль-Ниньо, потоков космических лучей и др.

8. Продолжены аналитические исследования траекторий спутников и показано возникновение нерегулярной составляющей движения этих космических объектов. Доказана теорема устойчивости движения экваториального спутника на круговой орбите под действием гравитационного потенциала. Определены орбитальные параметры спутника, при которых движение спутника будет устойчиво. Доказана теорема о том, что при обычных для Солнечной системы параметрах пары планета-спутник (звезда-планета) круговое движение спутника в экваториальной плоскости устойчиво. Конкретные параметры условия

устойчивости движения спутника имеют практическое значение для прогнозирования движения искусственных спутников. Результат исследования может быть использован, например, при поиске вне Солнечной системы планет с радиусом близким к юпитеровскому, но их орбиты гораздо ближе к центральному телу. Анализ показал, что возникновение хаоса при движении тел в солнечной системе обусловлено гравитационными резонансами, которые приводят к изменению орбит. Выявление соответствующих параметров позволит их использовать в анализе данных дистанционного зондирования Земли и других планет.

В 2012 г. член коллектива проекта "Серфотрон" Костадин Шейретски защитил докторскую диссертацию по теме "Динамика на экваториального спутника". Основные публикации по этой теме реализованы при поддержке международного авторского коллектива проекта "Серфотрон".

Наиболее важные публикации результатов исследований в этой области:

Shkevov R., N. S. Erokhin, L.A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova. Numerical investigation of the efficiency of charged particles surfatron acceleration by wave packets in space plasma. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.07.001>. JASTP V.99, pp. 73-77, 2013. IF= 1.671,

Эта статья признана самым важным и ярким научным достижением ИКИТ БАН за 2012 г. - Отчет ИКИТ БАН за 2012 г., опубликовано в январе 2013 г, 8 стр. <http://www.space.bas.bg/> Значимость достижения была отмечена журналом «Природа» – издание Болгарской академии наук - Крупное научное постижение Института космических исследований и технологий БАН, "Природа", № 3, стр.94.

Аннотация этой публикации, часть работы проекта «Серфотрон», имеется в документах Народного собрания – документ № 350-01-104/03.07.2013, соответственно отчет БАН – документ № 305-00-06/29.04.2013, в качестве достижения Института космических

Статьи, доклады в трудах конгрессов и конференций

1. N.S. Erokhin, N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya, R. Shkevov, Small-Parametric Nonlinear Model to Study the Features of Regional Large-Scale Cyclogenesis. Sun and Geosphere, 2009, 4(1), p.13-15. Volume is published in 2011.
2. Nikolay Erokhin, Nadezhda Zolnikova, Ludmila Mikhailovskaya, Evgenii Kuznetsov, Rumen Shkevov. The features of strong surfatron acceleration of charged particles by waves in space plasmas. Numerical modeling. Sixth Scientific Conference with International Participants SES 2010, Sofia, Bulgaria, 2-4 November 2010, Conference Proceedings, 2011, pp.10-15. Invited paper.
3. Nikolay Erokhin, Nadezhda Zolnikova, Ludmila Mikhailovskaya, Irina Krasnova, Rumen Shkevov. Coherent structures influence on electric field behavioral fluctuations for in thunderstorm clouds Sixth Scientific Conference with International Participants SES 2010, Sofia, Bulgaria, 2-4 November 2010, Conference Proceedings, 2011, pp. 384-388. Invited paper.
4. N. S. Erokhin, L.A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova, R. Shkevov. Numerical investigation of surfatron acceleration efficiency of the charged particles by wave packets in space plasma. International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun–Earth System II, Borovets, Bulgaria, September 11–16, 2011. Book of Abstracts, p.22.
5. N. S. Erokhin, L.A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova, R. Shkevov. Solar activity and tropical cyclogenesis correlations variability. International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun–Earth System II, Borovets, Bulgaria, September 11–16, 2011. Book of Abstracts, p.23.
6. Erokhin N.S., Shkevov R., Mikhailovskaya L.A. On the coupling of tropical large-scale cyclogenesis with the solar activity. Third Workshop "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere" Sozopol, Bulgaria, 6 – 10 June, 2011, Space and Solar-Terrestrial Research Institute Bulgarian Academy of Sciences, Book of abstracts, p.29.
7. К. Шейретски, М. Лазарова, Н. Ерохин. Динамика на екваториален спътник. Научна конференция с международно участие "Космонавтиката като фактор за развитие на международното научно и хуманитарно сътрудничество", София, България, 20 април, 2011. Conference program – p.3.
8. K. Sheiretsky, R. Shkevov, N. Erokhin. Satellite dynamics rotating ones around its own axis within two revolutions around the planet. C. R. Acad. Bulg. Sci., 2012, v.65, No 4, p.505-512. IF = 0.211
9. Ерохин А.Н., Н.С. Ерохин, Р. Шкевов. Серфотронное ускорение слаборелятивистских электронов пакетом электромагнитных волн в плазме при большой амплитуде волнового поля. XLVIII Всероссийская конференция по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, опто-электроники. Тезисы докл.,

Москва, РУДН, 2012, с. 310-314.

10. Ерохин Н.С., Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская, Р. Шкевов. Малопараметрическая модель регионального циклогенеза с вариациями скорости ветра в тропических циклонах. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Москва, 2012, т.9, No. 2, с.214-219.
11. Erokhin N. S., L.A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova, R. Shkevov. On the phase plane structure for surfatron acceleration of electrons by the wave packet in space plasmas. Seventh Scientific Conference with International Participation SES 2011, Sofia, Bulgaria, 29 November – 1 December 2011. p.19-26.
12. Erokhin N. S., L.A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova, R. Shkevov. The nonlinear dynamics of regional cyclogenesis with wind velocity variations. Seventh Scientific Conference with International Participation SES 2011, Sofia, Bulgaria, 29 November – 1 December 2011. p.27-32.
13. Sheyretski K., M. Lazarova, R.Shkevov, N. Erokhin. Satellite dynamics in planetary equatorial plane. Seventh Scientific Conference with International Participation SES 2011, Sofia, Bulgaria, 29 November – 1 December 2011. p.92-98.
14. Shkevov R., N.S. Erokhin. Continuous measurement during the active space experiment. 39-th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR), Mysore, India, 14-22 July. 2012. COSPAR paper number is C5.1-0038-12.
15. Erokhin N.S., N.N.Zolnikova, R.Shkevov and L.A.Mikhailovskaya. The capture to Cherenkov resonance and following surfatron acceleration of weakly relativistic charges in space plasmas by electromagnetic waves packet. 39-th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR), Mysore, India, 14-22 July. 2012. COSPAR paper number: D3.3-0021-12
16. Erokhin N.S., L.A. Mikhailovskaya, N.N. Zolnikova, R. Shkevov. Solar activity and tropical cyclogenesis correlations variability. International Workshop "On the possible correlations between solar activity and tropical cyclogenesis" Sozopol, Bulgaria, 8 – 12 June, 2012. <http://www.stil.bas.bg/WS-sozopol/>
17. Ерохин А.Н., Н.С. Ерохин, Р. Шкевов. Серфотронное ускорение слаборелятивистских электронов пакетом электромагнитных волн в плазме при большой амплитуде волнового поля. XLVIII Всероссийская конференция по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, опто-электроники., РУДН, 15-18 мая 2012, Москва, Россия. – Программа конференции стр.9. <http://rgs.vniims.ru/rudn2012prog.pdf>; <http://www.conference.sci.pfu.edu.ru/node/60>
18. Ерохин Н.С., Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская, Р. Шкевов. Малопараметрическая модель регионального циклогенеза с вариациями скорости ветра в тропических циклонах. Десятая всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, 12 – 16 ноября 2012, Москва, Россия. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011.html
19. Shkevov R., N. S. Erokhin, L.A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova. Numerical investigation of the efficiency of charged particles surfatron acceleration by wave packets in space plasma. JASTP V.99, pp. 73-77, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.07.001>. 5-Year IF= 1.671.
20. Skevov R., N. Erokhin, L. Mikhailovskaya, N. Zolnikova. Relativistic acceleration of the charged particles by the wave packets in space plasma. Proceedings of International

Congress Science, EducationTechnology "40 Years Bulgaria - Space Country", 12-14 September 2012, Scientists House – BAS, Varna, Bulgaria, Vol.1, p.193-202.

21. Erokhin N.S., R. Skevov, L.A., Mikhailovskaya, N.N. Zolnikova. Analysis of the dependence of electrons surfatron acceleration by the wave packet in space plasma from the longitudinal momentum of the particle. Eighth Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 4–6 December 2012, Sofia, Bulgaria, pp. 27-32, 2013.
22. Erokhin N.S., L.A., Mikhailovskaya, N.N., Zolnikova, R. Skevov. Typhoon genesis dynamics considering wind speed variations in the whirlwind. Eighth Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 4–6 December 2012, Sofia, Bulgaria, Proceedings pp. 33-37, 2013.
23. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Theorem for stability of the equatorial satellite motion Eighth Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 4–6 December 2012, Sofia, Bulgaria, Proceedings pp. 171-174, 2013.
24. Rumén Shkevov, Nikolay Erokhin, Nadezhda Zolnikova, Ludmila Mikhailovskaya. Analysis of charged particles trajectory dynamics accelerated by the wave packet in space plasma. „The 12th Scientific Assembly of the IAGA, August 25-31, 2013, Yukatan, Mexico” - Paper 4.1-43p. Abstract volume IAGA 2013 – p. 244.
25. Nikolay Erokhin, Nadezhda Zolnikova, Lyudmila Mikhailovskaya, Rumén Shkevov. Small parametric model of three typhoon generation with variations of wind speed in tropical cyclones. „The 12th Scientific Assembly of the IAGA, August 25-31, 2013, Yukatan, Mexico”. Paper 2.4-50p. Abstract volume IAGA 2013 – p. 183.
26. Shkevov R., Erokhin N.S., Zolnikova N.N., Mikhailovskaya L.A. Analysis of protons surfatron acceleration by the electromagnetic wave in space plasma. "Fifth Workshop Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere Nessebar, Bulgaria, 3-7 June 2013"-Program p.1.
27. Erokhin N.S. , Zolnikova N.N., Mikhailovskaya L.A., Shkevov R. . Analysis of small-parametric model of seasonal behavior of large-scale regional cyclogenesis with wind velocity variations. "Fifth Workshop Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere Nessebar, Bulgaria, 3-7 June 2013" - Program p.2.
28. Erokhin N.S., R. Shkevov, N.N., Zolnikova, A.N. Erokhin, L.A., Mikhailovskaya. Study of surfatron acceleration of electrons in space plasma for diverse longitudinal particle momentum - Conference program, 2013, p.5. - Invited talk.
29. Erokhin N.S., R. Shkevov, L.A., Mikhailovskaya, N.N., Zolnikova. Tropical cyclogenesis dynamics with wind velocity variations. Ninth Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 20 - 22 November 2013, Sofia, Bulgaria"-Conference SES 2013 program – p.5;
30. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Theorem for Resonance Hamiltonian of Non-autonomous Oscillating System. Ninth Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 20 - 22 November 2013, Sofia, Bulgaria"-Conference SES 2013 program – p.9;
31. Erokhin N.S., R. Shkevov, N.N., Zolnikova, A.N. Erokhin, L.A., Mikhailovskaya. Study of surfatron acceleration of electrons in space plasma for diverse longitudinal particle momentum. Proceedings of Ninth Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Safety", 20-22 November 2013, Sofia, Bulgaria, SES 2013, ISSN 1313-

- 3888, Proceedings pp. 549-555, 2014. – Invited Paper.
32. Erokhin N.S., R. Shkevov, L.A., Mikhailovskaya, N.N., Zolnikova. Tropical cyclogenesis dynamics with wind velocity variations. Proceedings of Ninth Scientific Conference with International Participation “Space Ecology Safety”, 20-22 November 2013, Sofia, Bulgaria, SES 2013, ISSN 1313-3888, Proceedings pp. 556-561, 2014.
 33. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Theorem for Resonance Hamiltonian of Non-autonomous Oscillating System. Proceedings of Ninth Scientific Conference with International Participation “Space Ecology Safety”, 20-22 November 2013, Sofia, Bulgaria, SES 2013, ISSN 1313-3888, Proceedings pp. 115-119, 2014.
 34. N.S. Erokhin, N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya, R.Shkevov, Studying of electrons surfatron acceleration with a packet of electromagnetic waves in space plasmas, Proceedings of the International Conference MSS 2014 "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence", Moscow, 24 - 27 November, 2014, p.p. 149-154
 35. Shkevov R., N.S. Erokhin, N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya. Analysis of the interesting cases of electrons surfatron acceleration in space plasma. Tenth Anniversary Scientific Conference with International Participation “Space Ecology Safety”, 12 - 14 November 2014, Sofia, Bulgaria. SES 2014 -<http://www.space.bas.bg/>
 36. Erokhin N.S., N.N. Zolnikova, L.A., Mikhailovskaya, R. Shkevov. Capture and highly relativistic acceleration of electrons by electromagnetic waves packet in the space plasmas for relativistic initial energy of particles. Tenth Anniversary Scientific Conference with International Participation “Space Ecology Safety”, 12 - 14 November 2014, Sofia, Bulgaria. SES 2014 - <http://www.space.bas.bg/>
 37. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Method of osculating elements for studying the movement of equatorial elliptical earth satellite in the presence of dynamic symmetry. Tenth Anniversary Scientific Conference with International Participation “Space Ecology Safety”, 12 - 14 November 2014, Sofia, Bulgaria, SES 2014 - <http://www.space.bas.bg/>
 38. Erokhin N.S., N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya, R.Shkevov, Studying of electrons surfatron acceleration with a packet of electromagnetic waves in space plasmas, Proceedings of the International Conference MSS 2014 "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence", Moscow, 24 - 27 November, 2014.
 39. Kostadin Sheiretsky, Nikolay Erokhin, Rumen Shkevov. Main resonance investigation of equatorial satellite motion. Program of the International Conference MSS 2014 "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence", Moscow, 24 - 27 November, 2014.
 40. Erokhin N.S., R.S. Shkevov, N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya. Analysis of Capture and Surfatron Ultrarelativistic Acceleration of Electrons with Initial Relativistic Energy. Proceedings of the 8th Congress of the Balkan Geophysical Society, 4-8 October 2015, Chania, Greece. Paper number 26997.
 41. Erokhin N.S., N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya, R.S. Shkevov. Nonlinear Dynamics of Regional Cyclogenesis with Wind Speed Variations. Proceedings of the 8th Congress of the Balkan Geophysical Society, 4-8 October 2015, Chania, Greece – Paper number 26738.
 42. Erokhin N.S., N.N. Zolnikova, R. Shkevov, L.A. Mikhailovskaya. The highly relativistic surfatron acceleration of electrons by electromagnetic wave packet in space plasma. “Problems of atomic science and technology”. Series “Plasma electronics and new methods of acceleration”, № 4(98), pp.67-69, 2015.

43. Erokhin N.S., N.N., Zolnikova, R. Shkevov, L.A., Mikhailovskaya. Capture and ultrarelativistic acceleration of electrons by electromagnetic waves packet in space plasma at the initial relativistic energies of the particles Tenth Anniversary Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 12 - 14 November 2014, Sofia, Bulgaria", SES 2014. Proceedings pp. 11-17, 2015.
44. Erokhin N.S., N.N. Zolnikova, R.S. Shkevov. L.A. Mikhailovskaya, The capture and highly relativistic acceleration of electrons by electromagnetic wave in space plasma for relativistic initial energy of particles. Proceedings of LI All-Russia conference on problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics. Section "Plasma physics and interaction of the electromagnetic radiation with matter", Russia, Moscow, PFUR, 12-15 May 2015 pp. 210-212.
45. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Analytical investigation of the satellite resonant motion. Proceedings of LI All-Russia conference on problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics. Section "Theoretical mechanics", Russia, Moscow, PFUR, 12-15 May 2015. pp.132-134
46. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Method of osculating elements for studying the movement of equatorial elliptical earth satellite in the presence of dynamic symmetry. Tenth Anniversary Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 12 - 14 November 2014, Sofia, Bulgaria, SES 2014. Proceedings pp. 95-99, 2015.
47. Erokhin N.S., R.S. Shkevov, N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya. Analysis of Capture and Surfatron Ultrarelativistic Acceleration of Electrons with Initial Relativistic Energy. Proceedings of the 8th Congress of the Balkan Geophysical Society, 4-8 October 2015, Chania, Greece. Speaker: R. Shkevov.
48. Erokhin N.S., N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya, R.S. Shkevov. Nonlinear Dynamics of Regional Cyclogenesis with Wind Speed Variations. Proceedings of the 8th Congress of the Balkan Geophysical Society, 4-8 October 2015, Chania, Greece – Paper number 26738, Speaker: R. Shkevov.
49. Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, Р. Шкевов, Л.А. Михайловская. Захват и ультрарелятивистское ускорение электронов пакетом электромагнитных волн в космической плазме при релятивистских начальных энергиях частиц. LI Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, Тезисы докладов. Секция «Физика плазмы и взаимодействие электромагнитного излучения с веществом», Москва, РУДН, 2015, Программа конференции стр.7.
50. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Analytical investigation of the satellite resonant motion. Proceedings of LI All-Russia conference on problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics. Section "Theoretical mechanics", Russia, Moscow, PFUR, 12-15 May 2015 г. Conference program p.9.
51. Rumen Shkevov, Nikolay Erokhin, Nadezhda Zolnikova, Ludmila Mikhailovskaya. On the electron capture probability in surfatron acceleration. Seventh workshop "Solar influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", Sunny Beach, Bulgaria, 1-5 June 2015. Book of abstracts, p. 21.
52. Rumen Shkevov, Nikolay Erokhin, Nadezhda Zolnikova, Ludmila Mikhailovskaya. Protons surfatron acceleration by electromagnetic wave in space plasma. Seventh workshop "Solar influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", Sunny Beach, Bulgaria, 1-5 June 2015. Book of abstracts, p. 21.

53. Shkevov R., N.S. Erokhin, N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya. Strong surfatron acceleration of protons by an electromagnetic wave in space plasmas for relativistic initial energy of particles. Eleventh Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 4 - 6 November 2015, Sofia, Bulgaria, SES 2015. Conference program p.5.
54. Erokhin N.S., N.N. Zolnikova, L.A., Mikhailovskaya, R. Shkevov. Numerical calculations of IGW passage from the troposphere up to the ionosphere through. Eleventh Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 4 - 6 November 2015, Sofia, Bulgaria, SES 2015. Conference program p.5.
55. Sheiretsky K., R. Shkevov, N. Erokhin. Chaotic motions of the celestial bodies. Eleventh Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety", 4 - 6 November 2015, Sofia, Bulgaria, SES 2015. Conference program p.8.

Координаторы проекта

С болгарской стороны:

Главный ассистент: **Р.Шкевов**

С российской стороны

Профессор **Н.С.Ерохин**