



УДК 523.98

Модельное представление внепятенной солнечной вспышки

А. В. Боровик (aborovik@iszf.irk.ru)

Д. Ю. Мячин (myachin@iszf.irk.ru)

А. М. Уралов (uralov@iszf.irk.ru)

Аннотация. Представлена модель внепятенной солнечной вспышки на основе вспышки 16 марта 1981 г. Модель позволяет объяснить основные этапы развития вспышки и наблюдаемый феномен – протяженный яркий хромосферный «стример» над линией раздела полярности (ЛРП) продольного магнитного поля. В работе использовались наблюдения солнечной хромосферы в линии H α Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) и данные по магнитному полю обсерватории Кит Пик (США).

Ключевые слова: солнечно-земная физика, солнечная активность, солнечные вспышки.

Введение

Исследование солнечных вспышек представляет интерес не только с наблюдательной и теоретической точек зрения, но имеет и важный прикладной аспект – солнечные вспышки вызывают магнитные бури, оказывают влияние на функционирование систем связи, навигации, приводят к сбоям в работе космических аппаратов. Известно также, что солнечная активность оказывает заметное влияние на биосферу, климат, сейсмичность и атмосферные процессы на Земле, на психику и здоровье людей и т. д. Поэтому прогноз геоэффективных солнечных событий крайне актуален на сегодняшний день.

В настоящее время общепризнанно, что вспышки возникают из-за присутствия электрических токов, протекающих в корональной плазме солнечных активных областей. Появление этих токов связано с выходом магнитных полей на солнечную поверхность и сопровождается движениями фотосферной и хромосферной плазмы. С токами связана избыточная, или непотенциальная, составляющая магнитного поля. Из-за высокой электропроводности и больших пространственных масштабов (индуктивности) магнитное поле оказывается «вмороженным» в солнечную плазму. Поэтому быстрое вспышечное высвобождение избыточной магнитной энергии невозможно, если оставаться только в рамках представлений об обычной омической диссипации электрических токов. Решающими факторами являются магнитогидродинамические неустойчивости, обусловленные сложившейся в

ходе эволюции неоднородностью корональных токов, а также магнитное пересоединение в узких токовых слоях. Совместное действие этих факторов, по-видимому, обеспечивает эффективное преобразование накопленного в магнитосфере активной области избытка магнитной энергии в энергию излучения, энергичных частиц и гидродинамических движений плазмы.

Наиболее разработанной моделью солнечной вспышки в настоящее время является «стандартная» модель, объединяющая разные наблюдательные и теоретические схемы и называемая также моделью CSHKP [6; 8; 9; 7]. Эта модель неплохо описывает завершающую и, как правило, хорошо наблюдаемую фазу солнечной вспышки – фазу расходящихся вспышечных лент. Однако использование «стандартной» модели для объяснения начальной, а также импульсной фазы вспышки является проблематичным. Это обстоятельство становится понятным, если учесть близость начальной фазы солнечной вспышки к практически ненаблюдаемому и неясному моменту инициации всего вспышечного процесса. Наряду с этим в исследовании [10] показано, что появление первичных вспышечных лент над линией инверсии фотосферного магнитного поля также не имеет прямого отношения к «стандартной» модели. Авторами [10] сделана первая попытка объединения наблюдательных проявлений солнечной вспышки до и после запуска «стандартной» схемы с данными [13], полученными с помощью инструмента Atmospheric Imaging Assembly на борту космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO). Однако наблюдения SDO не ведутся в классической хромосферной линии H α . Имеющаяся у нас возможность привлечения качественных наземных наблюдений в этой линии, а именно наблюдений солнечной вспышки 16 марта 1981 г. в линии H α на Байкальской астрофизической обсерватории, позволила получить дополнительные данные, способствующие разрешению проблемы соответствия «стандартной» модели проявлениям солнечной вспышки.

Целью данной работы является построение первой эмпирической модели внепятенной солнечной вспышки на основе анализа хромосферных данных, полученных на Байкальской астрофизической обсерватории, и литературных результатов.

«Стандартная» модель солнечной вспышки

Наиболее подробно «стандартная» модель солнечной вспышки обсуждается в работе [11], в которой приведен ее эскиз (рис. 1).

Согласно этой модели поднимающийся вверх магнитный жгут (два его торца на поверхности Солнца представлены желтыми кружками) вытягивает магнитные силовые линии. Возникающие сходящиеся течения плазмы (указаны синими стрелками) вносят в область магнитного пересоединения поля противоположного направления. Течение плазмы после магнитного пересоединения обозначено красными стрелками. Внизу образуется вспышечная (красная) петля. Со временем процесс периодически повторяется. Над гаснущей первой вспышечной петлей (аркой) образуется вторая и т. д. В итоге основания вспышечных петель расходятся. В действительности вспышеч-

ных петель много, и они образуют аркаду, медленно растущую вверх. Основаниями вспышечной аркады являются теперь вспышечные ленты, расходящиеся от линии раздела магнитных полярностей.

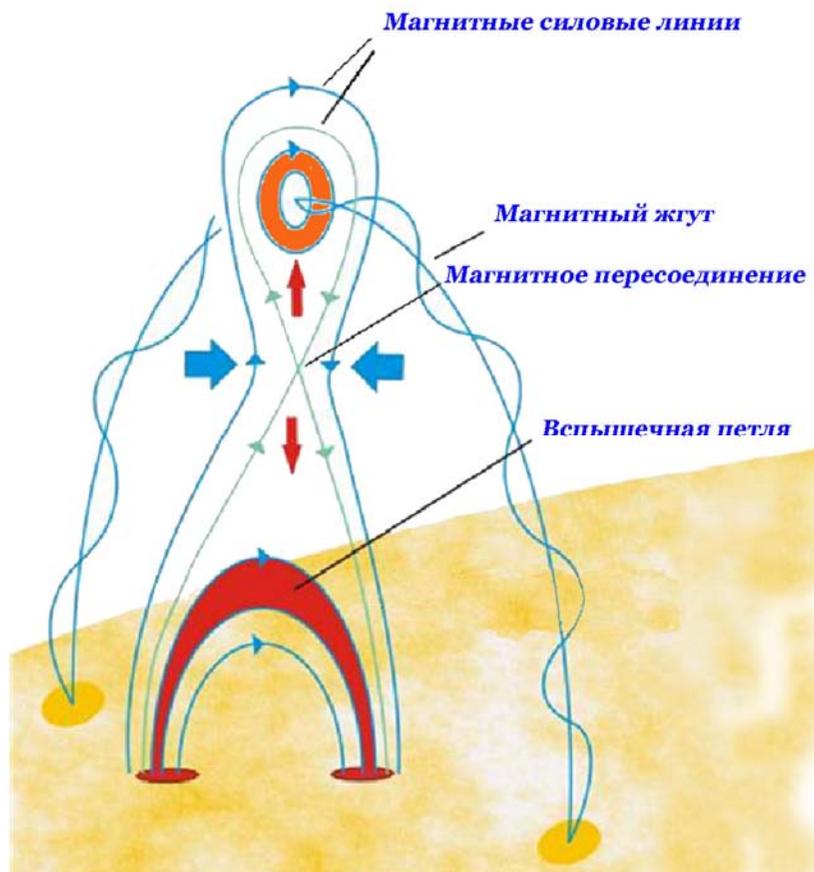


Рис. 1. «Стандартная» модель солнечной вспышки [11]

Эмпирическая модель внепятенной вспышки

В реальной ситуации на Солнце над ЛРП вместо магнитного жгута присутствуют магнитные структуры типа солнечных волокон (протуберанцев). Такое волокно над линией раздела полярностей существовало и в активной области перед вспышкой 16 марта 1981 г. [2]. Непосредственно перед вспышкой в хромосфере в области будущих вспышечных лент возникла вихревая структура S-типа [1; 5] (рис. 2), свидетельствующая о присутствии на уровне фотосферы сдвиговых течений, увеличивающих непотенциальность магнитного поля. На это указывал и факт развития лент вспышки навстречу друг другу вдоль ЛРП по направлению к центру вспышки. По нашим оценкам, угол сдвига составил 51° . В работах [3; 4] приведено подробное описание развития указанной вспышки.

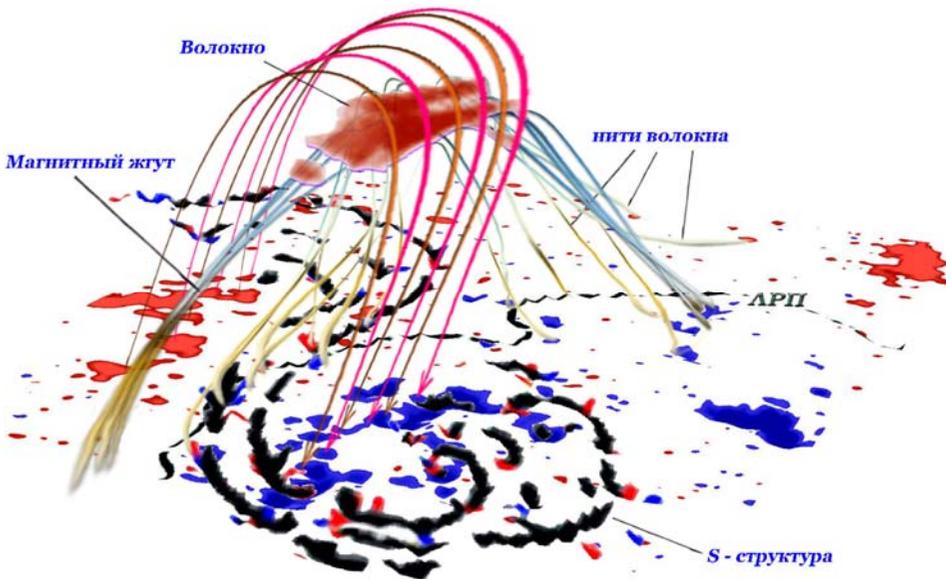


Рис. 2. Расположение волокна перед внепятенной солнечной вспышкой. Синим цветом отмечены холмы магнитного поля отрицательной полярности, красным – положительной. Волокно находится под магнитной аркадой, соединяющей холмы магнитного поля разной полярности. Тонкими линиями показаны многочисленные магнитные нити, оплетающие тело волокна и заканчивающиеся в окрестности ЛРП

Одной из особенностей вспышки 16 марта 1981 г. был необычный феномен – яркий вспышечный хромосферный «стример» – быстро распространяющийся вдоль линии раздела полярностей со скоростью порядка 400 км/с элемент вспышки (рис. 3), появление которого в рамках стандартной модели объяснить невозможно.

Поэтому нами предлагается следующая эмпирическая модель солнечной вспышки. В отличие от «идеального» магнитного жгута, изображенного на рис. 1, предвспышечное волокно связывается с фотосферой не только торцами, но и многочисленными нитями (*barbs, threads*) [14], которые укореняются в самых разных местах хромосферы, но большей частью вдоль ЛРП (см. рис. 2).

Перед вспышкой волокно, связанное с фотосферой многочисленными магнитными нитями, начинает медленно подниматься. Это приводит к вытягиванию нитей, их магнитному пересоединению (рис. 4). В итоге образуется многократно скрученная спираль, которая начинает быстро подниматься вверх. Далее процесс идет в соответствии со стандартной моделью.

Следует отметить, что в «стандартной» модели не хватает именно этапа пересоединения нитей, что могло бы объяснить появление вспышечного хромосферного «стримера», т. е. магнитное пересоединение, но тех магнитных структур, которые были не над эруптивным волокном, а принадлежали самому волокну (рис. 4 и 5).

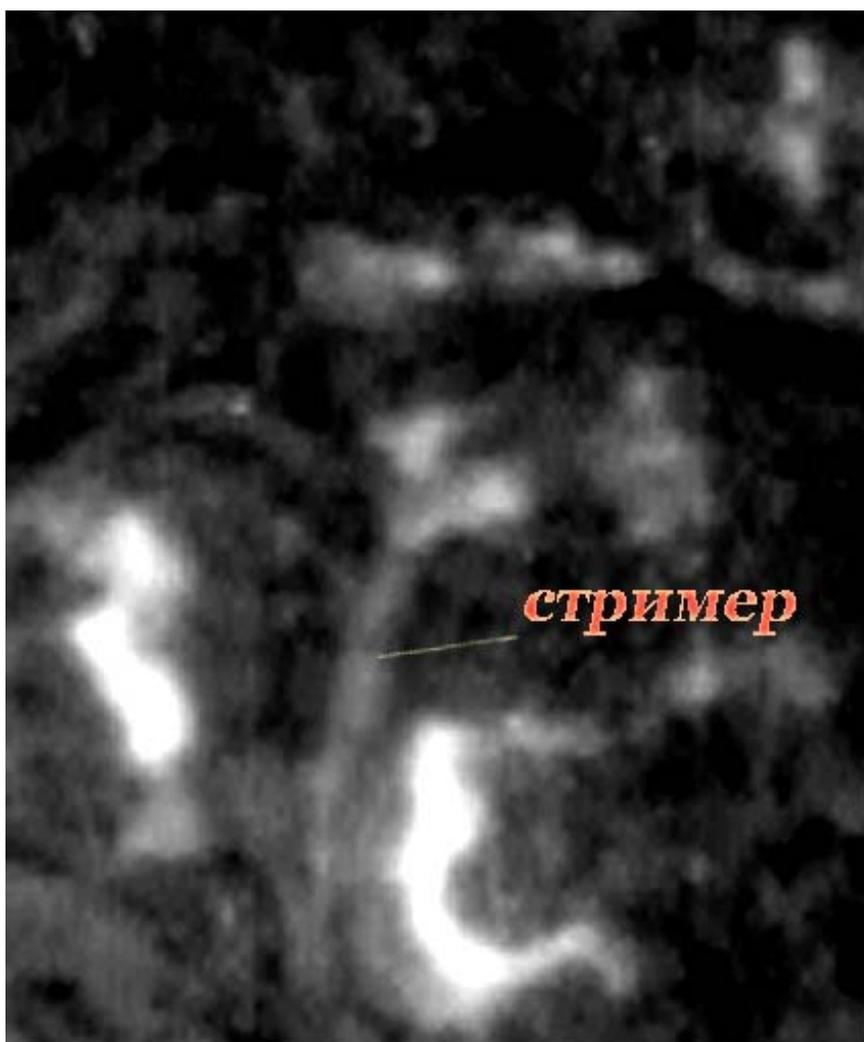


Рис. 3. Вспышечный хромосферный «стример» над линией раздела полярностей.
Справа и слева от «стримера» видны вспышечные ленты

На рисунке 5 показано магнитное пересоединение внешних, представленных на рис. 2 магнитных аркад, которые увлекаются поднимающимся магнитным жгутом. Магнитные нити больше не связывают эруптивное волокно с фотосферой. Желтым цветом выделен хромосферный «стример», пробегающий вдоль ЛРП по основаниям магнитных нитей, связывающих предвспышечное волокно с фотосферой. Оранжевым цветом выделены «стандартные» вспышечные ленты. Черным выделены волоконца, наблюдаемые в виде перевернутой буквы S.

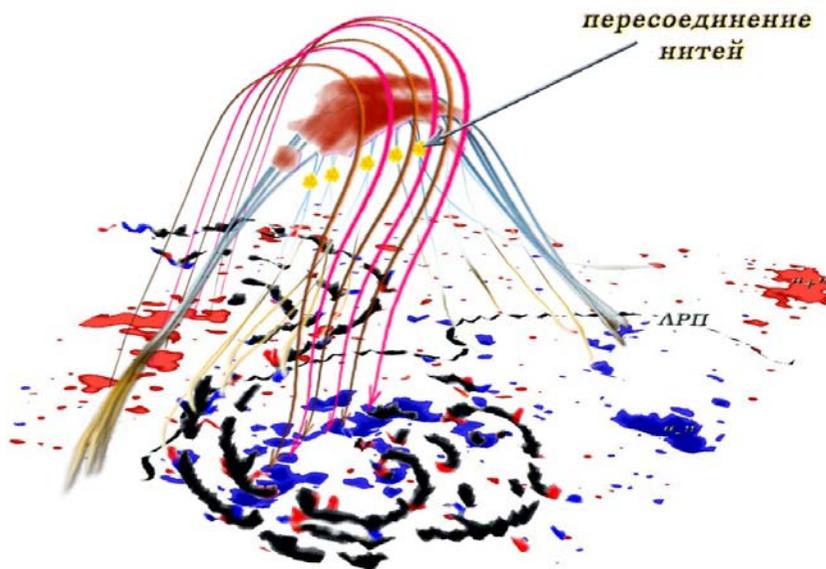


Рис. 4. Магнитное пересоединение нитей волокна перед импульсной фазой внепятенной солнечной вспышки. Волокно преобразуется в магнитный жгут

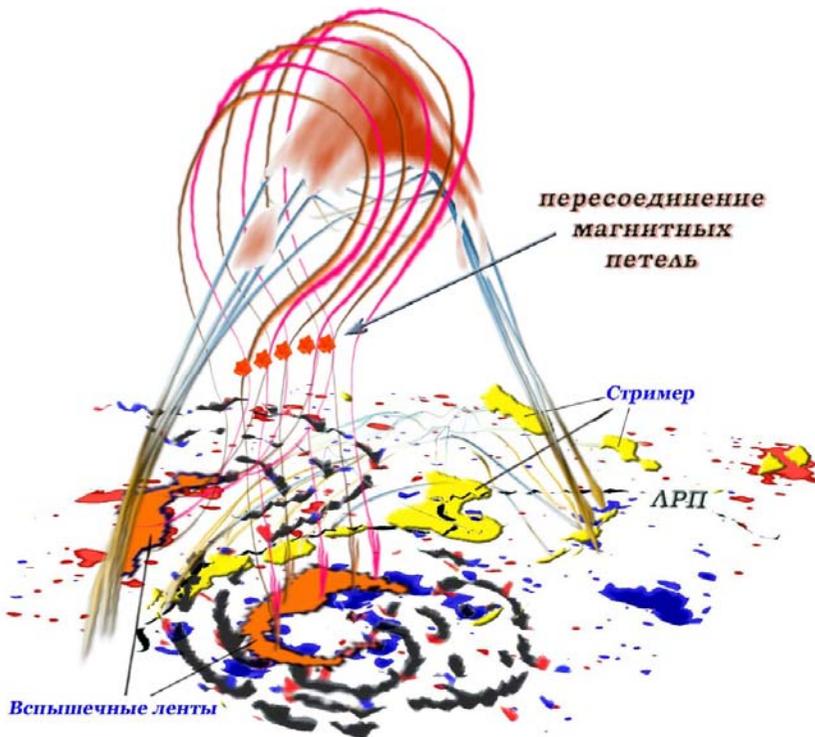


Рис. 5. Продолжение развития внепятенной солнечной вспышки, соответствующее «стандартной» модели

Заключение

Таким образом, на основе анализа хромосферных данных, полученных на Байкальской астрофизической обсерватории, и литературных результатов нами впервые разработана эмпирическая схема внепятенной солнечной вспышки, которая позволяет объяснить ненаблюдаемое ранее явление хромосферного «стримера», высокая скорость распространения которого вдоль ЛРП теперь легко согласуется со скоростью распространения волны «отрыва» эруптивного волокна от солнечной поверхности. Предложенная эмпирическая схема находится в хорошем соответствии с результатами, полученными в предыдущих исследованиях [7; 10].

Авторы весьма признательны д-ру физ.-мат. наук В. В. Гречневу за помощь при обсуждении статьи и полезные советы.

Список литературы

1. *Боровик А. В.* Особенности развития предвспышечной ситуации внепятенных солнечных вспышек / А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин // *Избранные проблемы астрономии : Небо и Земля : материалы III Всерос. астроном. конф., посвящ. 80-летию астроном. обсерватории ИГУ.* – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2011 – С. 82–91.
2. *Боровик А. В.* Предвспышечные активизации тонкой структуры хромосферы / А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин // *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца.* – М. : Наука, 2001. – Т. 113. – С. 154–166.
3. *Боровик А. В.* Наблюдения внепятенных солнечных вспышек в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и их интерпретация / А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин, В. М. Томозов // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле.* – 2014. – Т. 7. – С. 23–45.
4. *Borovik A. V.* Structure and Development of the Spotless Flare on March 16, 1981 / A. V. Borovik, D. Yu. Myachin // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2010. – Vol. 50, N 8. – P. 937–949.
5. *Borovik A. V.* The spotless flare of March 16, 1981. I. Preflare activations of the fine structure of the chromospheric fine structure / A. V. Borovik, D. Yu. Myachin // *Solar Physics.* – 2002. – Vol. 205. – P. 105–116.
6. *Carmichael H.* Proc. of AAS-NASA Symp. on the Physics of Solar Flares / H. Carmichael. – NASA-SP 50, 1964. – 451 p.
7. *Dual-filament* Initiation of a Coronal Mass Ejection: Observations and Model / A. M. Uralov, S. V. Lesovoi, V. G. Zandanov, V. V. Grechnev // *Solar Physics.* – 2002. – Vol. 208–P. 69–90.
8. *Hirayama T.* Theoretical model of flares and prominences. I: evaporating flare model / T. Hirayama // *Solar Physics.* – 1974. – Vol. 34, N 2. – P. 323–338.
9. *Kopp R. A.* Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon / R. A. Kopp, G. W. Pneuman // *Solar Physics.* – 1976. – Vol. 50, N 1. – P. 85–98.
10. *Responsibility* of a Filament Eruption for the Initiation of a Flare, CME, and Blast Wave, and its Possible Transformation into a Bow Shock / V. V. Grechnev, A. M. Uralov, I. V. Kuzmenko, A. A. Kochanov, I. M. Chertok, S. S. Kalashnikov // *Solar Physics.* – 2015. – Vol. 290, N 1. – P. 129–158.
11. *Shibata K.* Evidence of magnetic reconnection in solar flares and a unified model of flares / K. Shibata // *Astrophys. and Space Science.* – 1998. – Vol. 264. – P. 129–134.

12. *Sturrock P. A.* Model of the high-energy phase of solar flares / P. A. Sturrock // *Nature*. – 1966. – Vol. 211. – P. 695–697.

13. *The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)* / J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, C. Chou, J. F. Drake, D. W. Duncan, C. G. Edwards, F. M. Friedlaender, G. F. Heyman // *Solar Physics*. – 2012. – Vol. 275. – P. 17–40.

14. *Thin threads of solar filaments* / Y. Lin, O. Engvold, L. Rouppe van der Voort, J. E. Wiik, T. E. Berger // *Solar Physics*. – 2005. – Vol. 226. – P. 239–254.

Model of Solar Sunspotless Flare

A. V. Borovik, D. Yu. Myachin, A. M. Uralov

Abstract. We presented the model of sunspotless solar flare on the basis of flare on March 16, 1981. The model allows to explain the main stages of development of flare and observed phenomenon – extended bright chromospheric «streamer» over the polarity reversal line section of a longitudinal magnetic field. We used observational data of the solar chromosphere in the H α lines from the Baikal Astrophysical Observatory (BAO) and magnetic field data from Kitt Peak Observatory (USA).

Keywords: solar-terrestrial physics, solar activity, solar flares.

Боровик Александр Васильевич
кандидат физико-математических наук
заведующий обсерваторией
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а
тел.: (3952) 79-27-40

Borovik Aleksandr Vasil'evich
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Head of the Observatory
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126 a, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 79-27-40

Мячин Даниил Юрьевич
научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а
тел.: (3952) 64-39-01

Myachin Daniil Yur'evich
Research Scientist
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126 a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 64-39-01

Уралов Аркадий Михайлович
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а
тел.: (3952) 51-18-41

Uralov Arkadiy Mikhailovich
Doctor of Sciences (Physics and
Mathematics), Principal Researcher
Scientist
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126 a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 51-18-41