
АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПУТНИКА ACE

Андрей Шелестов, Ксения Житомирская, Николай Ильин, Игорь Кременецкий

Abstract: В работе предлагаются два алгоритма автоматического выявления ударных волн по интенсивности потока ионов на основе измерений спутника ACE, позволяющие определять 89% зафиксированных событий, что в 3 раза превышает точность известного алгоритма. Проведенные эксперименты подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов.

Keywords: сервисы, обработка данных, космическая погода

Введение

Основным из известных околоземных проявлений космической погоды, контролируемой солнечной активностью, являются магнитные бури. Влияние магнитных бурь на технику и человека неоспоримо, но их возникновение зависит от целого ряда условий. Согласно современной (господствующей) теории воздействие солнечной активности на Землю осуществляется через истекающий поток солнечной плазмы – «солнечный ветер» (СВ). Наиболее частым из геоэффективных возмущений СВ являются ударные волны (УВ). Ударные волны генерируются при солнечных вспышках, корональных выбросах масс (КВМ), на границах корональных дыр при смешении медленного и высокоскоростного потоков СВ. Генерация УВ происходит в областях солнечной короны, где скорость потока плазмы выше характерной магнитогиродинамической скорости.

Интервал времени между моментом генерации УВ и ее приходом на Землю составляет порядка нескольких дней. Прогнозирование времени прихода и интенсивности УВ поможет принять соответствующие меры по минимизации разрушительных последствий бурь. Поэтому дистанционная идентификация УВ в СВ и определение времени ее прихода является одной из самых важных задач краткосрочного прогноза состояния космической погоды околоземного пространства.

Поставленная в работе [1] задача прогноза ударной волны опирается на предположение об известности (или простоте определения) начала ударной волны, но физическое основание для такого предположения и механизм определения самого момента начала не приведены. В данной работе предлагается алгоритм автоматического определения ударных волн и анализируются физические предпосылки его функционирования. Результаты предлагаемого алгоритма более точны, чем полученные в [1], что подтверждается данными независимых наблюдений [2]. Применение предложенного алгоритма при прогнозировании времени прихода УВ позволит существенно повысить точность и достоверность прогноза.

Физические предпосылки дистанционной идентификации ударных волн

Присутствующие во всей Вселенной энергетические частицы не находятся в термодинамическом равновесии. Так как крупномасштабные электрические поля встречаются во Вселенной крайне редко, на протяжении большей части своей жизни заряженные частицы движутся по круговым орбитам под действием одной лишь силы Лоренца. Эта сила позволяет частице сохранять свою энергию постоянной,

таким образом, при отсутствии столкновений частица может увеличивать свою энергию только под действием электрического поля.

В 1949 году Ферми сформулировал теорию, согласно которой космические лучи ускоряются при рассеивании заряженных частиц на магнитных облаках, действующих как магнитные зеркала [3]. При встречном столкновении частица приобретает дополнительную энергию.

При ускорении Ферми первого порядка рассматривают два приближающихся зеркала, таким образом частицы колеблются между ними на протяжении многих лет, наращивая энергию при каждом столкновении. Энергия увеличивается пропорционально U/v , где U - скорость облака, v - скорость частицы. При ускорении Ферми второго порядка облака двигаются случайно. Так как столкновения с потерей энергии менее вероятны, то в результате чистый прирост энергии пропорционален U^2/v^2 .

Крупномасштабные процессы на Солнце сопровождаются турбулизацией среды, в ходе которой через стохастическое ускорение частицам передается энергия. В результате выбросов корональных масс Солнца формируется высокоскоростной поток плазмы, возбуждающий **ударную волну** (interplanetary shock, shock wave).

Ударная волна является наиболее эффективной конфигурацией, в которой работает эта теория, обеспечивая встречные столкновения для пересекающих ударный фронт частиц.

В ударной волне ускорение частиц происходит двумя способами: дрейфовым и диффузионным. При дрейфовом ускорении на ударном фронте отслеживается движение отдельных частиц в электромагнитном поле ударного фронта, а взаимодействием с флуктуирующими полями пренебрегают. Частицы много раз пересекают ударный фронт и каждый раз увеличивают энергию. Процесс диффузионного ускорения описывается модифицированным уравнением Фоккера-Планка, фактически описывающим диффузии в пространстве скоростей. [4-6]

Постановка задачи выявления ударных волн

Находящийся в точке Лагранжа L1 (~1% расстояния от Земли до Солнца) спутник ACE измеряет интенсивности потоков ионов. Таким образом, до регистрации на спутнике волна проходит порядка 148 млн. км. и, встречая на своем пути другие частицы, ускоряет их по направлению к Земле. Так как степень ускорения частиц пропорциональна скорости волны, то первые из них достигнут Земли приблизительно за два дня до прихода ударной волны. При распространении УВ к Земле интенсивность потоков солнечных энергетических частиц (СЭЧ) будет расти.

Резкое, не свойственное обычной картине колебаний, нарастание интенсивности СЭЧ во всех диапазонах называют **началом развития ударной волны** (onset) [1].

Результаты измерений для различных каналов спутника ACE, иллюстрирующие процесс развития ударной волны показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что однозначно определить момент начала развития ударной волны чрезвычайно сложно даже визуально. Для прогнозирования прихода ударной волны на Землю в реальном времени необходимо разработать алгоритм автоматического определения начала развития ударной волны. Несмотря на простоту визуального определения момента начала ударной волны на графиках измерений, разработка алгоритма автоматического детектирования развития ударной волны по данным измерений сопряжена с определенными трудностями. Во-первых, при определении начала развития ударной волны необходимо принимать во внимание измерения по всем информативным каналам спутника, а значит одновременно анализировать несколько числовых рядов. Во-вторых, кривые, построенные по результатам этих измерений являются негладкими и содержат пики

различной интенсивности, которые могут относиться как к одной и той же ударной волне, так и к следующим друг за другом волнам. Поэтому на основе экспериментального анализа данных спутника ACE необходимо также выработать процедуру автоматического определения порогового значения, которое можно использовать для детектирования ударных волн.

Таким образом, в работе ставится задача разработать формальную процедуру (алгоритм) для автоматического анализа измерений спутника ACE, выявления моментов турбулентности и начала развития ударных волн. Результаты работы такой процедуры в дальнейшем можно использовать для прогнозирования времени прибытия ударной волны на Землю в рамках интерактивного сервиса в разрабатываемой под эгидой Национального космического агентства Украины системе "Космическая погода".

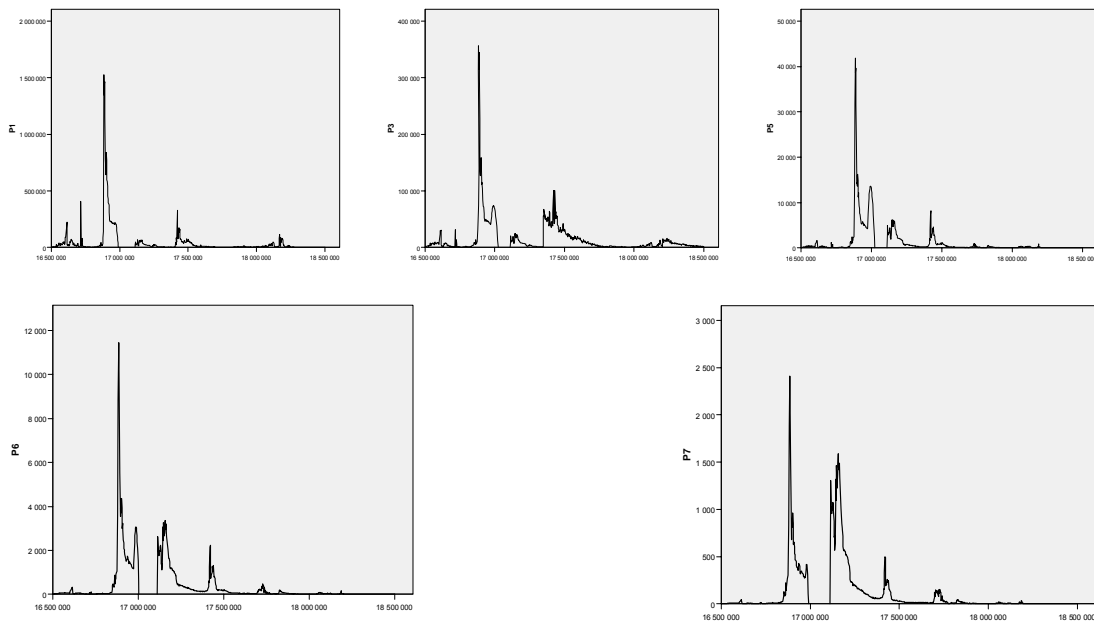


Рис. 1. Развитие ударной волны по измерениям спутника ACE

Разработанный алгоритм будет реализован в системе прогнозирования прибытия ударной волны в блоке детектирования начала ее развития (рис. 2). Исходные данные для функционирования такой системы в режиме реального времени предоставляются в частности на сервере наблюдения параметров космической погоды http://www.sec.noaa.gov/ftplib/lists/ace/ace_epam_5m.txt.



Рис. 2. Система прогнозирования прихода ударной волны

Выделение информативных данных

Хотя ударные волны оказывают влияние на все частицы, наиболее существенный прирост интенсивности наблюдается на высокоэнергетичных протонах. Спутник ACE определяет интенсивности по 8 протонным каналам каждые 5 минут.

Для определения информативных каналов необходимо проанализировать поступающие данные. Корреляционный анализ данных показал высокую степень корреляции между близкими по спектру каналами (табл. 1).

Таблица 1. Степень корреляции между отдельными каналами спутника ACE за 1999-2000 годы

	Диапазон частиц (MeV)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	0.047-0.066	1	,987	,782	,921	,897	,817	,721	,640
P2	0.066-0.114	,987	1	,794	,941	,919	,825	,710	,618
P3	0.114-0.190	,782	,794	1	,862	,784	,715	,620	,540
P4	0.190-0.310	,921	,941	,862	1	,966	,896	,783	,679
P5	0.310-0.580	,897	,919	,784	,966	1	,964	,873	,778
P6	0.580-1.05	,817	,825	,715	,896	,964	1	,967	,898
P7	1.05-1.89	,721	,710	,620	,783	,873	,967	1	,974
P8	1.89-4.75	,640	,618	,540	,679	,778	,898	,974	1

Как видно из табл. 1, данные каналов P2, P4, P8 целесообразно опустить, поскольку уменьшение пространства задачи до пяти каналов не только не снижает общей информативности данных, но и позволяет существенно сократить объем обрабатываемых данных и как следствие снизить сложность вычислений. При появлении ошибок в основных каналах, данные вспомогательных каналов можно использовать для восстановления утраченной информации. Так, по динамике P2 можно либо спрогнозировать следующее значение P1, либо полностью заменить интенсивности канала P1 на P2.

Предлагаемый алгоритм определения начала ударной волны

Для автоматического определения момента развития ударной волны необходимо выполнить сглаживание данных, устранив высокочастотную составляющую сигнала, а также определить «скорость» нарастания интенсивности частиц (угол наклона сглаженной кривой), учитывая данные всех информативных каналов.

Предлагаемый способ идентификации начала ударной волны основывается на пороговой фильтрации, так как по определению момент начала развития ударной волны характеризуется ростом интенсивности частиц по всем каналам. Для определения начала развития ударной волны предлагается следующий обобщенный алгоритм:

- Построение обобщенного канала и вычисление его скорости;
- Сглаживание обобщенной скорости развития процесса;
- Пороговая фильтрация данных.

Построение общей скорости для каналов может быть произведено несколькими способами. Рассмотрим два варианта алгоритма:

- Вычисление скоростей по отдельным каналам с последующим определением обобщенной скорости;
- Построение обобщенного канала и вычисление скорости изменения интенсивности частиц для этого канала.

Рассмотрим первый случай, предполагающий вычисление скоростей по отдельным каналам с последующим определением обобщенной скорости. Сначала определим скорости по отдельным каналам (обозначенным индексом i)

$$V_i(t) = \frac{dP_i(t)}{dt}, \quad (1)$$

а затем объединим их для получения обобщенной скорости

$$V_M(t) = \prod_{i=1}^N V_i(t). \quad (2)$$

В (1)-(2) приняты следующие обозначения: $\frac{dP_i(t)}{dt} = \frac{P_i(t) - P_i(t - \Delta t)}{\Delta t}$ — численно определяемая производная функции интенсивности канала P_i по времени, $i = 1..N$; $V_i(t)$ — скорость изменения интенсивности частиц в канале P_i в момент времени t , $i = 1..N$; $V_M(t)$ — общая скорость изменения интенсивности по всем каналам в момент времени t ; N — число информативных каналов; Δt — интервал между двумя последовательными измерениями.

Рассмотрим второй случай, состоящий в построении виртуального обобщенного канала и вычислении скорости изменения интенсивности частиц для него. Сформируем обобщенный канал

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (3)$$

для которого вычислим общую скорость

$$V_C(t) = \frac{dP(t)}{dt}. \quad (4)$$

В (3)-(4) приняты следующие обозначения: $P(t)$ — обобщенная интенсивность в момент времени t , полученная на основе измерений по всем каналам; $\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t) - P(t - \Delta t)}{\Delta t}$ численно определяемая производная общей интенсивности по времени; $V_C(t)$ — общая скорость изменения интенсивности; N — число информативных каналов.

Формализация алгоритма и сравнительный анализ вариантов модификаций

Помимо описанных выше данных спутник ACE также измеряет скорость и плотность солнечного ветра. Эту информацию можно использовать для верификации получаемых результатов определения ударной волны, поскольку пик ударной волны соответствует резкому изменению плотности и/или скорости

солнечного ветра. На основе информации о параметрах солнечного ветра за 2000 год [7] сформируем список событий, которые должны быть определены детектором как ударные волны.

Сначала вычислим обобщенные скорости $V_M(t)$ по формуле (2) и $V_C(t)$ по формуле (4) для всех моментов измерений t . Для снижения влияния случайных колебаний интенсивностей частиц выполним сглаживание полученных значений во временном окне, содержащем данные k последовательных измерений

$$\bar{V}_M(t) = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k V_M(t+i\Delta t) \quad (5)$$

$$\bar{V}_C(t) = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k V_C(t+i\Delta t) \quad (6)$$

Размер окна ($k=4$) был определен экспериментально: меньший размер не обеспечивает эффективного сглаживания данных, а при большем размере окна может быть потеряна наиболее важная информация об экстремальных значениях измеряемых величин.

Для каждого из подходов определим числовые значения порогов T_C и T_M , которые будут использоваться для последующей фильтрации. В первом приближении значение порога предлагается получать по методу минимакса на основе вычисления минимального за рассматриваемый период d значения максимальной общей скорости в дни с выраженной турбулентностью значений интенсивности солнечного ветра:

$$L_M = \min_d \max_{t \in D} \bar{V}_M(t) \quad (7)$$

$$L_C = \min_d \max_{t \in D} \bar{V}_C(t) \quad (8)$$

где d — рассматриваемый диапазон значений дат, D — множество дней с выраженной турбулентностью интенсивности солнечного ветра.

Выполним пороговую фильтрацию с использованием вычисленных по формулам (7) и (8) пороговых значений. Пусть Ω_M и Ω_C — множества значений скоростей, вычисленных по формулам (2) и (4) и отфильтрованных с использованием пороговых значений (7) и (8) соответственно:

$$\Omega_M = \{\bar{V}_M(t) : \bar{V}_M(t) \geq L_M\} \quad (9)$$

$$\Omega_C = \{\bar{V}_C(t) : \bar{V}_C(t) \geq L_C\} \quad (10)$$

Сгруппируем данные по степени временной близости. На основании статистического анализа исторических данных измерений и архивных данных [7], [2] в данной работе принято предположение о параметрах ударной волны – отфильтрованные измерения, отвечающие скачкам интенсивности, между которыми прошло не более 12 часов, относятся к одной ударной волне.

Результаты экспериментов

Для определения корректности применения предложенных в предыдущем разделе вариантов алгоритма и определения числовых значений порогов был проведен анализ данных за 2000 год, в результате которого были построены предполагаемые периоды ударных волн. Экспериментальное исследование построено таким образом, чтобы на основе известных периодов ударных волн получить значения ошибок первого и второго рода для двух вариантов алгоритма.

Из 60 реальных дат ударных волн, по критерию V_C были определены как относящиеся к ударным волнам 53 даты, что соответствует ошибке 1-го рода равной 0.117, а по V_M – 44 даты (0.267).

При сравнении полученных результатов с наблюдениями по солнечному ветру, оба варианта алгоритма дали одинаковое значение ошибки 2-го рода (ложное оповещение о приближении ударной волны). Ошибка 1-го рода для второго варианта составляет 0.117, что существенно меньше, чем 0.267 для первого варианта, что позволяет говорить о предпочтительности использования обобщенного канала.

Выводы

В данной статье предложены два варианта алгоритма определения начала развития ударных волн.

Результаты работы алгоритма позволяют не только существенно повысить эффективность предсказания прихода ударной волны, но и рассматривать при обучении практически все зафиксированные ударные волны. Начало удалось зафиксировать в 89% ударных волн, что в 3 раза больше чем в известном ранее алгоритме [1]. Одним из путей повышения точности определения ударных волн является введение коррекции значений порогов в режиме реального времени.

Литература

- [1] J. Vandegriff, K. Wagstaff, G. Ho, J. Plauger Forecasting space weather: Predicting interplanetary shocks using neural networks, *Advances in Space Research* 36 (2005) p. 2323–2327
- [2] Списки космических бурь за 1997-2006 г.г. (ИЗМИРАН)
<http://helios.izmiran.troitsk.ru/cosray/events.htm>
- [3] Fermi E. On the origin of the cosmic radiation // *Phys. Rev.* 1949. V. 75. P. 1169-1174.
- [4] Blandford R.D., Eichler D. Particle acceleration at astrophysical shocks: a theory of cosmic ray origin // *Phys. Rep.* 1987. V. 154. 1-75.
- [5] Jones F.C., Ellison D.C. The plasma physics of shock acceleration // *Space Sci. Rev.* 1991. V. 58 P. 259-346.
- [6] Kirk J.G. Particle acceleration // *Plasma Astrophysics* / Ed. By J.G. Kirk, D.B. Melrose, E.R. Priest. – Berlin: Springer-Verlag, 1994. P. 225-314.
- [7] Интерактивный архив данных по солнечному ветру
<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/afs/SWEPAMdata.html>

Авторы

Шелестов Андрей Юрьевич - Институт космических исследований НАН и НКА Украины, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, докторант; проспект Академика Глушкова 40, 03680 Киев, Украина; e-mail: inform@ikd.kiev.ua

Житомирская Ксения Геннадиевна - Институт космических исследований НАН и НКА Украины, инженер-программист 1 категории; проспект Академика Глушкова 40, 03680 Киев, Украина; e-mail: ksu.zhytomirsky@gmail.com

Ильин Николай Иванович - Институт космических исследований НАН и НКА Украины, инженер-программист 1 категории; проспект Академика Глушкова 40, 03680 Киев, Украина;

Кременецкий Игорь Алексеевич - Институт космических исследований НАН и НКА Украины, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник; проспект Академика Глушкова 40, 03680 Киев, Украина.