

УДК 523.62-726

ДРЕЙФОВОЕ УСКОРЕНИЕ ЭНЕРГИЧНЫХ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПРОТОНОВ НА ГЕЛИОСФЕРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ: САМОСОГЛАСОВАННАЯ 3D КИНЕТИКО-МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Чалов С.В.¹, Малама Ю.Г.^{1,2}, Алексашов Д.Б.^{1,2}, Измоленов В.В.^{1,2,3}

¹ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Москва, 119526, пр. Вернадского, 101-1*

² *Институт космических исследований РАН,
Москва, 117342, ул. Профсоюзная, 84/32*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

chalov@ipmnet.ru; ymalama@yandex.ru;
alexashov@ipmnet.ru; izmod@ipmnet.ru

Аннотация

Приводятся результаты численного исследования дрейфового ускорения межзвездных захваченных протонов на гелиосферной ударной волне в рамках трехмерной кинетико-магнитогидродинамической модели. В модели учитывается процесс отражения частиц на фронте ударной волны, связанный со скачком магнитного поля. Отражение может быть многократным из-за рассеяния протонов по питч-углу в областях перед и за фронтом ударной волны. Очень важным моментом является учет вариаций направления магнитного поля в окрестности ударной волны, связанных с прохождением секторной структуры межпланетного магнитного поля через фронт на малых гелиоширотах. Существенное преимущество модели по сравнению с имеющимися на данный момент – это самосогласованное описание протонов и межзвездных атомов водорода, которые описываются на кинетическом уровне и взаимодействуют с протонами посредством процесса перезарядки. Результаты исследования позволяют объяснить потоки энергичных протонов (30 кэВ – 10 МэВ), измеренных на космических аппаратах Вояджер-1 и Вояджер-2 после пересечения ими гелиосферной ударной волны.

Ключевые слова: численное моделирование, дрейфовое ускорение межзвездных захваченных протонов на гелиосферной ударной волне, трехмерная кинетико-магнитогидродинамическая модель.

SHOCK-DRIFT ACCELERATION OF ENERGETIC INTERSTELLAR PROTONS AT THE HELIOSPHERIC TERMINATION SHOCK: SELF-CONSISTENT 3D KINETIC-MAGNETOHYDRODYNAMICAL MODEL

Chalov S.V.¹, Malama Yu.G.^{1,2}, Aleksashov D.B.^{1,2}, Izmodenov V.V.^{1,2,3}

¹ *Ishlinskyi Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Russia, Moscow, 119526*

² *Russian Space Research Institute RAS, Russia, Moscow, 117342*

³ *Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow, 119991*

The results of numerical study of shock-drift acceleration of interstellar pickup protons at the heliospheric termination shock in the framework of a 3D kinetic-magnetohydrodynamic model are presented. The model takes into account reflections of the particles at the shock front due to the jump of the magnetic field. The reflections can be multiple owing to pitch-angle scattering of the protons in the upstream and downstream parts of the flow. A very important effect, which is included in the model, is variations of the magnetic field direction in a vicinity of the shock.

The variations are connected with transitions the sector structure of the interplanetary magnetic field through the shock at low heliolatitudes. The advantage of the model as compared with other models is a self-consistent description of protons and interstellar hydrogen atoms, which are described kinetically and interact with protons through the charge exchange process. The results of the study allow to explain the fluxes of energetic protons (30 keV ÷ 10 MeV) measured at the Voyager-1 and Voyager-2 spacecraft after the termination shock crossing.

Key words: numerical simulation, 3D MHD model, drift acceleration.

1. Введение

В декабре 2004 и в августе 2007 гг. космические аппараты (КА) Вояджер-1 и Вояджер-2 пересекли гелиосферную ударную волну торможения солнечного ветра [1–5] и вошли во внутренний ударный слой – область между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой, разделяющей солнечный ветер и за ряженную компоненту межзвездной среды. Расстояния до ударной волны в моменты пересечения были различны: 94 а.е. для Вояджера-1 и 84 а.е. для Вояджера-2. Это различие может быть объяснено, например, вариациями динамического давления солнечного ветра, связанного с циклом солнечной активности, и динамическим влиянием межзвездного магнитного поля, которое приводит к нарушению симметрии области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой.

Измерения спектральных характеристик энергичных протонов за фронтом гелиосферной ударной волны на КА Вояджер-1/2 показали, что энергетические распределения этих частиц в диапазоне энергий от 30 кэВ/н до нескольких МэВ/н являются степенными [2], причем распределения по скоростям близки к $f \propto v^{-5}$. Для объяснения измерений была разработана численная модель дрейфового ускорения межзвездных захваченных протонов на гелиосферной ударной волне в трехмерной геометрии. Тепловые и энергичные протоны, а также межзвездные атомы водорода учитываются самосогласованным образом. Взаимодействие между протонами и атомами осуществляется через перезарядку. В модели учитываются многократные отражения протонов от фронта ударной волны и рассеяние частиц по питч-углам в окрестности фронта. Существенным фактором, влияющим на энергетические спектры ускоренных частиц, является вариация направления магнитного поля в окрестности ударного фронта, связанная с прохождением секторной структуры поля через фронт. Секторная структура связана с наличием гелиосферного токового слоя, разделяющего солнечные магнитные поля с разной полярностью. Протяженность токового слоя по гелиошироте меняется с циклом солнечной активности – в минимуме гелиоширотный угол минимальный, с ростом солнечной активности угол увеличивается. Энергетический спектр ускоренных частиц существенно зависит от угла между нормалью к ударной волне и направлением магнитного поля. Там, где Вояджеры пересекли гелиосферную ударную волну, она должна быть почти перпендикулярной. В этом случае дрейфовое ускорение захваченных протонов не эффективно, поскольку для реализации такого ускорения частицы изначально должны были бы иметь достаточно высокие энергии. Однако, наличие флуктуаций направления магнитного поля приводит к тому, что в течение достаточно продолжительных промежутков времени ударная волна является квазиперпендикулярной. Это обстоятельство позволяет захваченным протонам вступать в режим дрейфового ускорения даже в тех случаях, когда их энергия невелика.

2. Описание модели

2.1. Захваченные межзвездные ионы

Понятие о захваченных ионах связано с процессом взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (ЛМС). ЛМС, окружающая солнечную систему, является частично ионизованной средой, состоящей главным образом из нейтральных атомов. Межзвездные атомы оказывают сильное влияние на глобальную структуру области взаимодействия (гелиосферный интерфейс), а также на физические процессы в гелиосфере [6–7]. Помимо

того, что положение и форма гелиосферной ударной волны и гелиопаузы существенно определяются динамическим влиянием атомов, они приводят к образованию в солнечном ветре особой «горячей» популяции захваченных межзвездных ионов. Так как длина свободного пробега межзвездных атомов сравнима с размерами гелиосферы, они могут относительно легко проникать во внутренние области солнечной системы. В гелиосфере некоторая часть атомов превращается в ионы из-за перезарядки с протонами солнечного ветра, фотоионизации или ионизации электронным ударом. Согласно современным данным, скорость межзвездного ветра относительно Солнца равна приблизительно 26 км/с. Скорости межзвездных атомов в гелиосфере могут отличаться от этой величины из-за теплового разброса, ускорения гравитационным полем Солнца или вследствие процесса перезарядки в возмущенной межзвездной среде между гелиопаузой и головной ударной волной. Но в любом случае эти скорости намного меньше скорости сверхзвукового солнечного ветра, которая изменяется в пределах от 350 км/с до 750 км/с в зависимости от гелиошироты или солнечной активности. Из этого можно заключить, что в системе координат, связанной с солнечным ветром, скорости ионов, образующихся в результате ионизации межзвездных атомов, приблизительно равны локальной скорости солнечного ветра. Сразу после образования движение ионов (в системе координат, связанной с солнечным ветром) складывается из циклотронного вращения вокруг силовых линий магнитного поля и движения вдоль этих линий. Таким образом, межзвездные ионы «захватываются» электрическими и магнитными полями солнечного ветра и переносятся во внешние области гелиосферы. В данной работе рассматриваются только захваченные протоны.

Движение межзвездных захваченных протонов описывается уравнением типа Фоккера-Планка для гиротропной функции распределения частиц по скоростям с учетом их рассеяния по питч-углу. Рассеяние происходит в результате взаимодействия частиц с альвеновскими волнами. Кулоновскими столкновениями можно пренебречь. Уравнение Фоккера-Планка решалось с помощью преобразования этого уравнения в эквивалентную систему стохастических обыкновенных дифференциальных уравнений (СДУ). Система СДУ описывает траектории частиц в пространстве координат и скоростей. Точнее, эта система описывает координаты ведущего центра заряженной частицы, поскольку она получена путем осреднения функции распределения по ларморовскому вращению (предположение о гиротропии), и две скорости: параллельную и перпендикулярную магнитному полю (см. детали в [8]).

2.2. Дрейфовое ускорение

Циклотронный радиус типичного захваченного протона во внешней гелиосфере на несколько порядков превышает циклотронные радиусы протонов солнечного ветра. Толщина гелиосферной ударной волны, которая является бесстолкновительной, не более нескольких циклотронных радиусов протонов солнечного ветра [5]. Таким образом, при взаимодействии захваченных протонов с гелиосферной ударной волной последнюю можно рассматривать как магнитогидродинамический разрыв.

Исследование процесса прохождения энергичных заряженных частиц через ударную волну существенно упрощается, если пользоваться системой координат, в которой электрическое поле отсутствует по обе стороны разрыва (система Гофмана – Теллера). В этой системе координат при отсутствии рассеяния магнитный момент частицы после ее взаимодействия с ударной волной остается таким же, каким он был до начала взаимодействия [9]. Сохранение магнитного момента и кинетической энергии в системе координат Гофмана – Теллера позволяет определить условия, при которых частица либо проходит через ударную волну, либо отражается от нее вследствие возрастания напряженности магнитного поля за разрывом. При отражении энергия частицы возрастает из-за дрейфа в направлении магнитного поля в процессе взаимодействия с разрывом. Отраженная частица может возвратиться к ударной волне благодаря рассеянию по питч-углу в набегающем потоке и испытать второе и последующие отражения. В результате энергия частицы может возрасти на несколько порядков. Здесь

следует сделать важное замечание. Процесс взаимодействия заряженной частицы с разрывом продолжается в течение того времени, пока разрыв пересекает ларморовскую орбиту этой частицы. Этот промежуток времени достаточно мал (около часа). Поэтому в этом случае мы пренебрегаем рассеянием по питч-углам, что позволяет использовать условие сохранения магнитного момента частицы. В набегающем потоке отраженная частица может проводить несколько суток и, следовательно, рассеянием пренебрегать нельзя.

Условие отражения частицы определяется величиной ее скорости по отношению к скорости плазмы перед ударной волной в системе координат Гофмана – Теллера и величиной питч-угла этой частицы. Кроме того, характер взаимодействия энергичных заряженных частиц с ударной волной существенно зависит от геометрии магнитного поля вблизи нее. Определяющим параметром является угол Ψ между вектором магнитного поля и нормалью к ударной волне. Условие отражения можно записать в следующем приближенном виде [9]:

$$v > \frac{V_{sh} \sec \Psi}{\sqrt{b}},$$

где v – скорость заряженной частицы в системе координат, связанной с плазмой перед разрывом; V_{sh} – скорость плазмы перед разрывом; b – скачок напряженности магнитного поля на разрыве. Таким образом, как видно из неравенства, процесс отражения (обычно он называется адиабатическим отражением) работает только для частиц с достаточно большими скоростями.

2.3. Крупномасштабные вариации магнитного поля

Согласно теоретическим моделям распределения межпланетного магнитного поля в гелиосфере и измерениям магнитного поля на КА оно является почти азимутальным на больших расстояниях от Солнца. Тогда в головных областях гелиосферной ударной волны, там, где ее пересекли КА Вояджер-1 и Вояджер-2, угол Ψ в среднем должен быть близок к 90° . В этом случае из приведенного выше неравенства следует, что для эффективного дрейфового ускорения захваченных протонов их исходная энергия должна быть достаточно велика – гораздо больше той энергии, которую они на самом деле имеют при образовании в результате ионизации атомов водорода. Однако, как отмечалось выше, на низких гелиоширотах межпланетное магнитное поле имеет секторную структуру. При прохождении этой структуры через КА или ударную волну полярность магнитного поля изменяется примерно в течение одного дня. Иными словами, за относительно короткий промежуток времени вектор магнитного поля поворачивается на 180° , и, следовательно, в какие-то моменты даже на больших расстояниях от Солнца магнитное поле становится почти радиальным. На рис. 1 приведены распределения вероятностей для азимутального угла магнитного поля перед гелиосферной ударной волной, построенные по результатам измерений на магнетометрах, установленных на КА Вояджер-1/2.

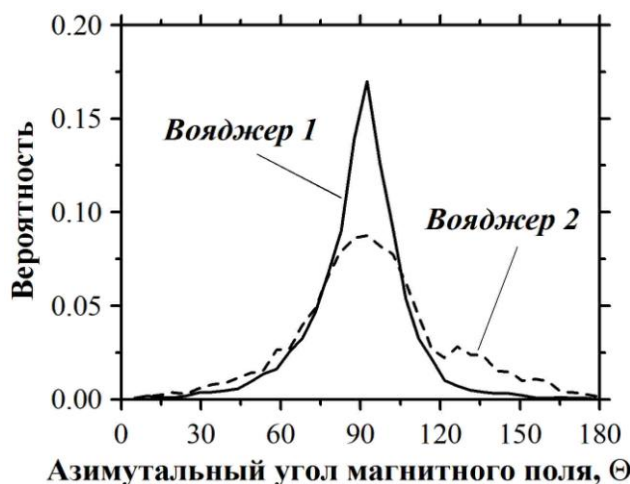


Рис. 1. Распределения вероятностей для азимутального угла межпланетного магнитного поля перед ударной волной по измерениям на КА Вояджер-1/2

КА Вояджер-1/2 измеряют три компоненты магнитного поля — азимутальную, радиальную и широтную. Для нахождения угла между вектором магнитного поля и нормалью к ударной волне использовались все компоненты, но наиболее важной величиной является азимутальный угол, так как угол Θ близок к Ψ . Из рисунка видно, что наиболее вероятной величиной для Θ является 90° , то есть чисто азимутальное магнитное поле. Этот результат находится в полном соответствии со стационарными теоретическими моделями. Однако в определенные промежутки времени измеряются и другие углы, и это обстоятельство очень важно для дрейфового ускорения захваченных межзвездных протонов на гелиосферной ударной волне.

2.4. 3D кинетико-магнитогидродинамическая модель

В качестве основы при исследовании ускорения заряженных частиц на гелиосферной ударной волне мы используем нашу 3D кинетико-магнитогидродинамическую модель взаимодействия солнечного ветра с двухкомпонентной ЛМС, состоящей из электронно-протонной плазмы и межзвездных атомов водорода. Кинетическое уравнение Больцмана для атомов решается самосогласованно вместе с уравнениями идеальной МГД для тепловой плазмы. Помимо тепловых заряженных частиц, у которых распределение по скоростям близко к максвелловскому, в модель включены межзвездные захваченные протоны. Многочисленные данные, полученные на различных КА, свидетельствуют о том, что скоростные распределения этих частиц существенно немасвелловские. Поэтому, как мы уже отмечали, они описываются уравнением типа Фоккера – Планка для функции распределения по скоростям. Протоны и атомы взаимодействуют главным образом через перезарядку. Фотоионизация и ионизация атомов электронным ударом также включены в модель. Влияние межзвездных атомов и захваченных протонов на течение тепловой плазмы учитывается в правых частях МГД уравнений — для атомов это источники (стоки), влияние захваченных протонов описывается членом с градиентом их давления. Для того, чтобы не перегружать статью громоздкими формулами, мы ограничимся ссылкой [7], где можно найти кинетические уравнения для атомов и захваченных протонов, а также выражения для источников в МГД уравнениях.

Для решения трехмерной МГД задачи использовался аналог метода Годунова повышенного порядка точности с выделением сильных разрывов. В качестве приближенного решения задачи Римана о распаде разрыва использовалась нелинейная схема HLLD (Harten – Lax – van Leer Discontinuity) [10], позволяющая более качественно выделять сильные разрывы. Для решения уравнения Больцмана использовался метод Монте-Карло с расщеплением траекторий.

3. Результаты

Благодаря отражениям захваченных протонов от ударной волны их распределение по скоростям в подвижной системе координат является анизотропным. Как упоминалось выше, при расчетах дифференциальных потоков энергичных протонов используется система стохастических дифференциальных уравнений, описывающих стохастические траектории частиц в фазовом пространстве. Перед и за ударной волной на некотором расстоянии вводится граница, при достижении которой считается, что распределение энергичных протонов становится изотропным, и они движутся с той же средней скоростью, что и тепловая плазма.

При подходе захваченного протона к ударной волне угол между направлением магнитного поля и нормалью к ударной волне разыгрывается в соответствии с распределениями вероятностей, представленными на рис. 1. Как видно из рисунка, это распределение различно в направлении движения КА Вояджер-1 и Вояджер-2. Вдали от ударной волны вариации направления магнитного поля не учитывались. Область, занятая гелиосферным токовым слоем и в которой происходят вариации направления поля, ограничена по гелиошироте. Размер этой области характеризуется широтным углом «раствора». На больших широтах вариаций нет и дрейфовое ускорение на гелиосферной ударной волне неэффективно. На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты расчетов дифференциальных потоков захваченных протонов за гелиосферной ударной волной, в тех областях, где ее пересекли КА Вояджер-1/2. Расчеты проведены для различных модельных значений угла «раствора» токового слоя. Приведены также результаты измерений (красные линии на рисунках).

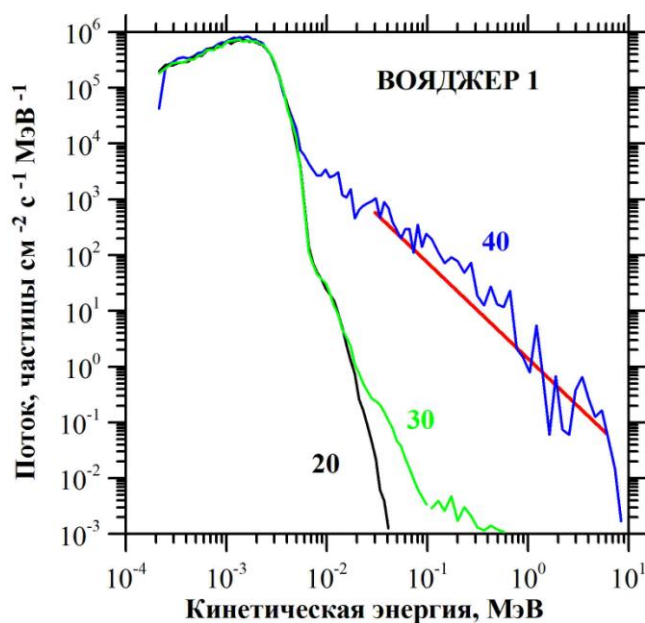


Рис. 2. Дифференциальные потоки захваченных протонов за фронтом гелиосферной ударной волны для КА Вояджер-1. Красная линия – измерения. Черная, зеленая и синяя линии результаты расчетов для углов «раствора» токового слоя 20°, 30° и 40°

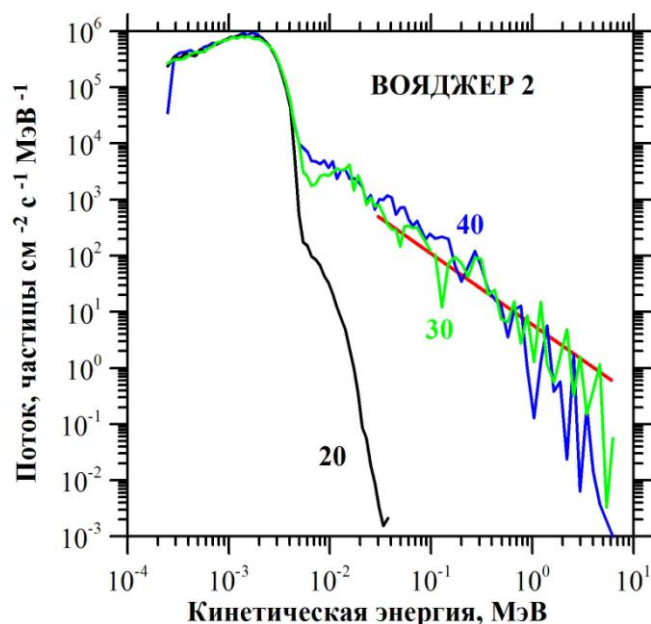


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для КА Вояджер-2

После исследования внешних планет КА Вояджер-1/2 вышли из плоскости эклиптики. Траектория Вояджера-1 находится в северном полушарии, Вояджера-2 в южном. В момент пересечения гелиосферной ударной волны отклонения КА от плоскости эклиптики по широте лежали в диапазоне $30^\circ \div 40^\circ$, причем Вояджер-1 был более удален от оси токового слоя по широте, чем Вояджер-2. Результаты численных расчетов ярко демонстрируют зависимость эффективности дрейфового ускорения на ударной волне от флуктуаций направления магнитного поля. При угле «раствора» токового слоя в 20° (черные кривые) КА находятся вне области, занятой токовым слоем, и ускорение практически отсутствует. Если этот угол равен 30° (зеленые кривые), то Вояджер-2 попадает в область, занятую токовым слоем, а Вояджер-1 находится выше этой области. Различия в потоках в диапазоне высоких энергий очевидны. При угле «раствора» в 40° (синие кривые) оба КА находятся в области, занятой токовым слоем, и теоретические потоки близки к экспериментальным.

Выводы

Результаты измерений дифференциальных потоков энергичных протонов КА Вояджер-1/2 за гелиосферной ударной волной можно объяснить дрейфовым механизмом ускорения на ударной волне с учетом многократного отражения частиц. Многократному отражению способствует рассеяние отраженных частиц по питч-углу в набегающем потоке. Определяющим фактором, влияющим на эффективность ускорения, являются крупномасштабные флуктуации направления магнитного поля перед ударной волной, связанные с прохождением через нее секторной структуры межпланетного магнитного поля.

Работа была выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Грант № 13-01-00265) и Программы 22 Президиума РАН.

Литература

1. Stone E.C., Cummings A.C., McDonald F.B., et al. Voyager 1 Explores the Termination Shock Region and the Heliosheath Beyond, *Science*, V. 309, P. 2017, 2005.
2. Decker R.B., Krimigis S.M., Roelof E.C., et al. Voyager 1 in the Foreshock, Termination Shock, and Heliosheath, *Science*, V. 309, P. 2020, 2005.
3. Burlaga L.F., Ness N.F., Acuna M.H., et al. Crossing the Termination Shock into the Heliosheath: Magnetic Fields, *Science*, V. 309, P. 2027, 2005.

4. Burlaga L.F., Ness N.F., Acuna M.H., et al. Magnetic fields at the solar wind termination shock, *Nature*, V. 454, P. 75, 2008.
5. Richardson J. D., Kasper J.C., Wang C., et al. Cool heliosheath plasma and deceleration of the upstream solar wind at the termination shock, *Nature*, V. 454, P. 63, 2008.
6. Baranov V.B., Malama Y.G. Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium - Numerical solution of self-consistent problem, *J. Geophys. Res.*, V. 98, P. 15,157, 1993.
7. Malama Y.G., Izmodenov V.V., Chalov S.V. Modeling of the heliospheric interface: multi-component nature of the heliospheric plasma, *Astron. Astrophys.*, V. 445, P. 693, 2006.
8. Chalov S.V., Fahr H.J. Phase space diffusion and anisotropic pick-up ion distributions in the solar wind: an injection study, *Astron. Astrophys.*, V. 335, P. 746, 1998.
9. Toptygin I.N. Acceleration of particles by shocks in a cosmic plasma, *Space Sci. Rev.*, V. 26, P. 157, 1980.
10. Miyoshi T.K., Kusano K. A multi-state HLL approximate Riemann solver for ideal magnetohydrodynamics, *J. Comput. Phys.*, V. 208, P. 315, 2005.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2014 г.