



ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРНОЙ СИСТЕМОЙ

Н.А. Бархатов, Н.С. Беллюстин, Н.Н. Емельянов

Численными методами изучен процесс обтекания потоком плазмы солнечного ветра локализованного препятствия в виде магнитного поля Земли. Исследование проведено в магнитогидродинамическом приближении. Нестационарность такого взаимодействия определяется неоднородностями натекающего потока, а также переходными и волновыми процессами, обусловленными неустойчивостями движения среды. Компьютерная программа двумерного вычислительного магнитогидродинамического моделирования была создана авторами для исследования этих вопросов. Эта программа позволяет реализовать быстрый просмотр одномерных компьютерных динамических сценариев для подбора параметров. С помощью программы продемонстрировано модельное взаимодействие магнитосферы Земли с неоднородностью плотности и скорости в солнечном ветре. Показано, как модельное двумерное возмущение проникает во внутримангнитосферную область, создавая там заметное изменение земного магнитного поля. Решены трудности, связанные с хаотическими режимами из-за временной и пространственной дискретности вычислительной модели.

Введение

Взаимодействие потока плазмы солнечного ветра с магнитным полем Земли является предметом устойчивого интереса в связи с существенными изменениями, которые могут вызвать в окрестностях Земли нестационарные процессы на Солнце. Многие важные аспекты этого взаимодействия могут быть удовлетворительно рассмотрены в рамках магнитогидродинамического (МГД) приближения. При этом достаточно сильное магнитное поле Земли B_0 является локализованным препятствием на пути потока плазмы, и обтекание его плазмой во многом сходно с обычным гидродинамическим обтеканием препятствия потоком [1,2]. Нестационарность динамического обтекания определяется неоднородностями натекающего потока, а также турбулентностью, то есть переходными и волновыми процессами, обусловленными неустойчивостями движения среды. Ясно, что быстрое развитие вычислительной техники ставит в центр исследований околоземных МГД-процессов вычислительное

моделирование. Такой подход позволяет, в частности, успешно исследовать нелинейные процессы, практически недоступные аналитическим методам, применявшимся в научных исследованиях ранее [3, 4]. Однако на пути вычислительных методов есть трудности, самые серьезные из которых связаны с «вычислительными неустойчивостями». Они зависят от временной и пространственной дискретности модели. Кроме того, принципиальную роль играют недавно обнаруженные хаотические режимы в точечных нелинейных системах. Определенный порядок в их классификации удалось навести [5]. Однако, когда речь идет о большом числе связанных точечных элементов или о распределенной системе, вопрос об их устойчивости и поведении относится пока к сфере вычислительных экспериментов, где речь идет лишь о накоплении экспериментальных фактов и их предварительной систематизации. С учетом этих обстоятельств нами создана оригинальная компьютерная программа, реализующая известные МГД-уравнения для космической плазмы

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + c^2 \Delta \mathbf{B} / (4\pi\sigma),$$

$$\partial \mathbf{V} / \partial t = -(\mathbf{V}\nabla)\mathbf{V} - (V_s^2/\rho_0)\nabla\rho_0 - (\mathbf{B} \times \text{rot}\mathbf{B}) / (4\pi\rho_0) + (\eta/\rho_0)\Delta\mathbf{V} + (\zeta + \eta/3)(\text{grad div}\mathbf{V})/\rho_0,$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0,$$

$$\partial\rho_0/\partial t + \text{div}\rho_0\mathbf{V} = 0,$$

где \mathbf{B} - магнитное поле, \mathbf{V} - скорость плазмы, ρ_0 - плотность среды, V_s - скорость звука, η и ζ - коэффициенты вязкости, σ - проводимость.

Двумерная вычислительная МГД-модель позволяет, в частности, моделировать обтекание локализованной области сильного магнитного поля потоком плазмы. Главным преимуществом рассматриваемой двумерной модели перед «истинной» трехмерной является более высокая скорость счета, при этом с ее помощью можно выяснить многие важные свойства МГД-обтекания. Программа рассчитана на общедоступные персональные компьютеры типа Pentium III и в стандартном режиме использует пространственную сетку 600×600 точек. Интегрирование проводится методом конечных разностей с постоянной квадратной пространственной сеткой и с постоянным шагом интегрирования по времени. В программу встроена подпрограмма, реализующая интегрирование МГД-уравнений в одномерном приближении по аналогичной схеме. Она позволяет в сотни раз быстрее просматривать одномерные сценарии и подбирать оптимальные параметры задачи. Использование простейшей схемы интегрирования позволяет, когда это возможно, добиваться контролируемого перехода к случаю непрерывной среды путем измельчения пространственной сетки и временного шага. Как показали проведенные вычислительные эксперименты, сочетание одномерной и двумерной программ позволяет быстро продвигаться в понимании МГД-процессов.

В настоящей работе приведены результаты модельных расчетов рассеяния волновых возмущений на земной магнитосфере в двух случаях. В первом случае рассматривается простейшая модель, не учитывающая движение среды. При этом проясняются общая структура формирования модельной магнитосферы и физический смысл явления. Второй случай более близок к реальности - поток плазмы натекает на препятствие со скоростью, превышающей скорости волн среды, и формирует ударную волну.

1. Рассеяние возмущения в неподвижной среде

В первой группе численных экспериментов не будем учитывать скорость сноса солнечного ветра. Такое приближение важно для правильного понимания

процесса рассеяния и взаимодействия неоднородностей солнечного ветра с магнитосферой Земли. Рассеяние целесообразно рассмотреть в два этапа, поскольку область сильного магнитного поля в окружающей однородной плазме будет выдавливать плазму до тех пор, пока не установится равновесная статическая область с сильным магнитным полем и пониженной концентрацией плазмы. В таком процессе формирования самосогласованной «магнитосферы» вследствие диамагнетизма плазмы магнитное поле может несколько уменьшиться, если оно не поддерживается внешними источниками. Полученная статическая неоднородность в плазме и будет рассматриваться как модельная магнитосфера, которая на втором этапе этого вычислительного эксперимента подвергается воздействию неоднородности солнечного ветра.

Рассмотрим результаты проведенных вычислительных экспериментов, в которых вязкость среды была выбрана несколько завышенной по сравнению с реальным значением в солнечном ветре для обеспечения устойчивости и приемлемой быстроты численного счета. Фактически, в рассматриваемых примерах такое завышение вязкости проявляется только в незначительном затухании волны. На рис. 1 показан динамический процесс формирования модельной магнитосферы. Линейный размер представленной пространственной области составляет примерно 3 млн. км, размер модельной магнитосферы - около 200 тыс.

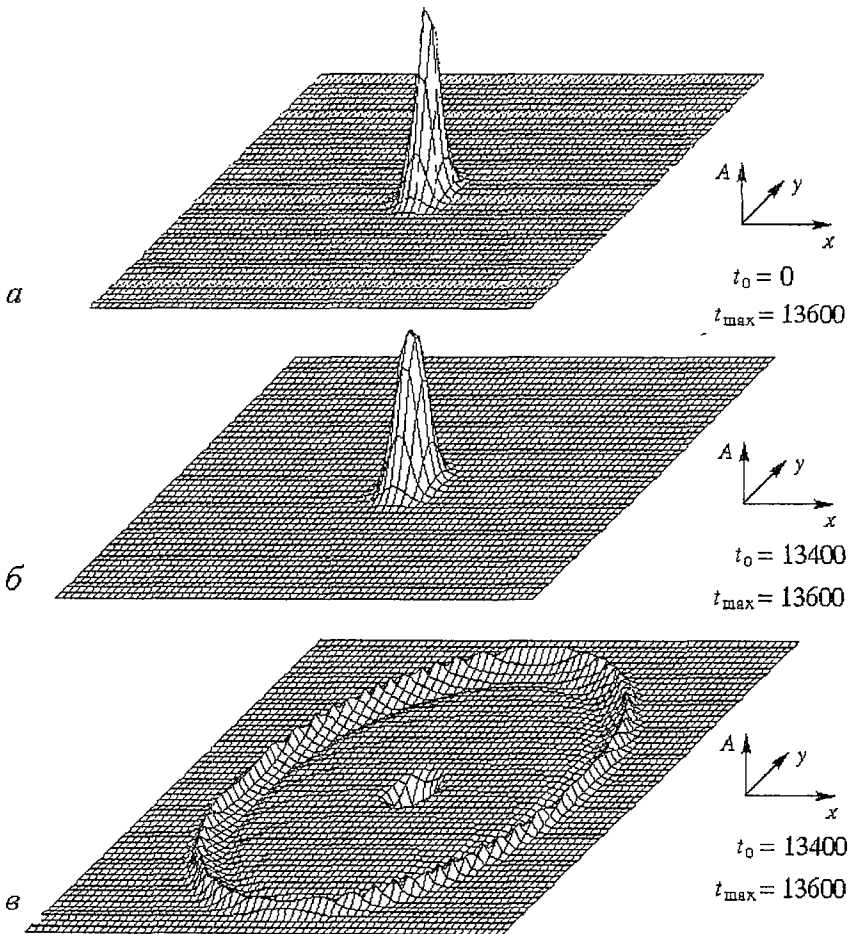


Рис. 1. Изменение магнитного поля (а, б) и плотности плазмы (в) в процессе формирования модельной магнитосферы

км. Рис. 1, а демонстрирует начальное условие - поперечную к плоскости ХУ компоненту сильного магнитного поля B_z с амплитудой в центре 0.3 Гс (аналога геомагнитного). Начальное магнитное поле компактно локализовано в области в центре рисунка. Остальные шесть переменных из МГД-уравнений в начальный момент тривиальны - пять из них равны нулю, а плотность постоянна. После необходимого числа итерационных шагов, реализующих уравнения, B_z - компонента магнитного поля несколько расплывается (рис. 1, б), зато информационно-содержательным становится распределение плотности, изображенное на рис. 1, в. В центральной области, где магнитное поле выдавило плазму, наблюдается сильный, но неподвижный статический провал плотности, окруженный разбегающейся звуковой концентрической волной.

Таким образом, рассматриваемый динамический процесс сопровождается выбросом из возмущенной области концентрической звуковой волны. Для получения модельной магнитосферы необходимо подождать, пока волна отойдет на достаточное расстояние, и вырезать пространственный фрагмент, что также позволяет созданное программное средство. Необходимые параметры, позволяющие вырезать центральную область рисунка в качестве модельной магнитосферы, можно быстро определить моделированием в одномерном приближении. Фрагмент, содержащий центральную область рисунка, принимается в качестве

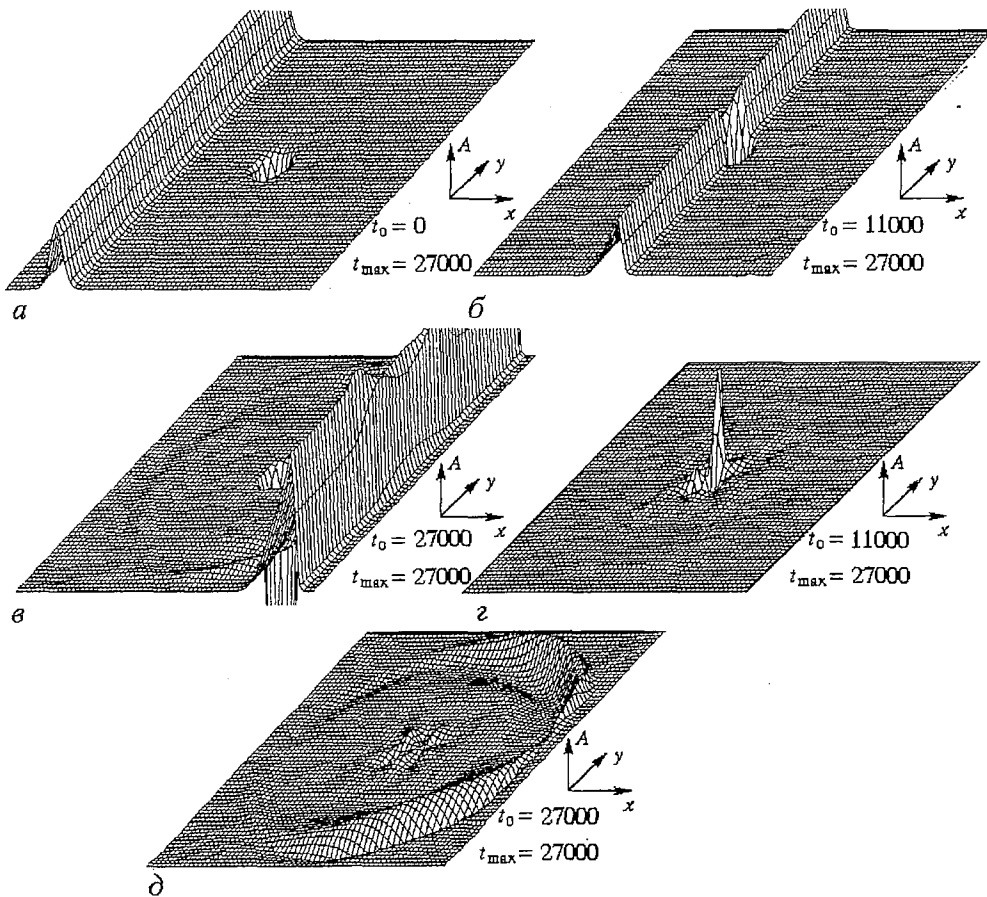


Рис. 2. Переменные плотности (а, б, в) и скорости (г, д) плазмы при прохождении волнового возмущения через магнитосферу

модельной магнитосферы. Созданная программа обеспечивает возможность использования в дальнейшем полученного фрагмента в виде начального условия.

Модельное рассеяние неоднородности солнечного ветра на земной модельной магнитосфере является вторым этапом этого исследования. Картина рассеяния представлена на рис. 2 распределением плотности и скорости плазмы. На рис. 2, *а* показано начальное распределение плотности: амплитуда возмущения составляла десятки процентов от фонового, скорость перемещения возмущения 500 км/сек; на рис. 2, *б* - распределение плотности в момент рассеяния; на рис. 2, *в* - прошедшая и рассеянная волны после взаимодействия магнитосферы с неоднородностью. На рис. 2, *г* и *д* показана компонента скорости V_y в момент взаимодействия и после рассеяния, соответственно. Длительность всего представленного на рисунках динамического процесса - примерно 6000 сек.

Особый интерес представляет изменение магнитного поля во внутренней области магнитосферы, в центральной части которой расположена Земля. Динамика изменения магнитного поля (рис. 3) свидетельствует о возрастании величины B_z примерно на 5% во время прохождения (рис. 3, *б*) неоднородности солнечного ветра с последующим восстановлением (рис. 3, *в*) после акта рассеяния. Таким образом, модель показывает, что процесс прохождения неоднородности через магнитосферу может сопровождаться значительным импульсом геомагнитного поля (SI), а также разбеганием волн в плазме солнечного ветра. Следует

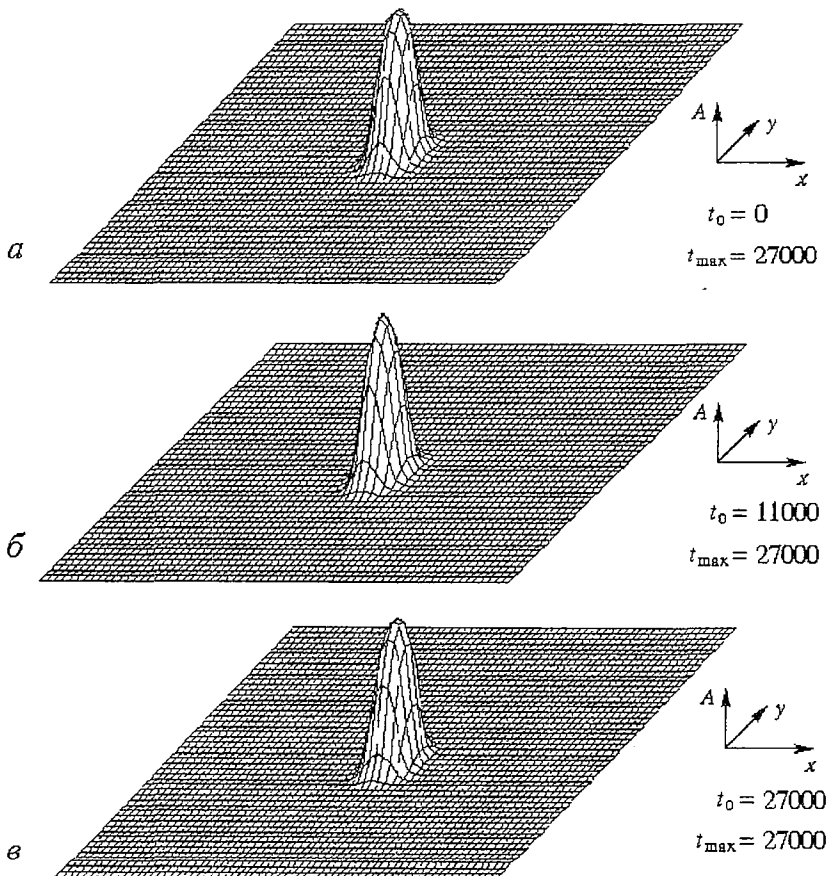


Рис. 3. Возрастание магнитного поля в момент прохождения возмущения через магнитосферу - «внезапный импульс»

ожидать, что качественно похожий процесс будет иметь место при рассмотрении влияния неоднородности солнечного ветра и в рамках более сложной модели.

2. Рассеяние неоднородности солнечного ветра на магнитосфере в условиях сноса среды

Рассмотрим теперь случай сноса плазмы солнечного ветра со скоростью, превышающей скорости волн среды. В этой ситуации область сильного магнитного поля в модели должна удерживаться внешней силой в точке (X_0, Y_0) - в противном случае она придет в движение и будет увлечена потоком. Для обеспечения этого нужно заменить в правой части МГД-уравнений \mathbf{B} на $\mathbf{B} + \mathbf{V}_0$, где \mathbf{V}_0 - магнитное поле Земли, которое направлено вдоль оси Z , не зависит от времени и определяется несложной модельной формулой, отвечающей дипольному распределению в плоскости XY

$$B_0 = A / [(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + r]^{1/2}.$$

Здесь A - постоянная, а малый параметр r добавлен для того, чтобы обеспечить конечное значение поля в точке (X_0, Y_0) .

Заключительный численный эксперимент по взаимодействию модельной магнитосферы с неоднородностью плотности и скорости поставлен уже с учетом обтекания магнитосферы плазмой солнечного ветра. На рис. 4 представлены стационарные профили четырех основных МГД-переменных, возникшие в результате обтекания плазмой области внешнего магнитного поля. Отношение скорости сноса к скорости звуковой волны (число Маха) здесь равно 5. Из рис. 4, *а* видно, что поток плазмы «выдувает» магнитное поле в хвост магнитосферы. Возникающая вследствие этого процесса стационарная структура магнитного поля качественно отражает свойства реальной земной магнитосферы. На рис. 4, *б* показано выдавливание плазмы из области сильного магнитного поля как в центральной области магнитосферы, так и в ее хвосте. Кроме этого отчетливо просматривается ударная волна в распределениях плотности и скорости, сформированная в результате взаимодействия потока солнечного ветра с локализованной областью сильного магнитного поля. Из рис. 4, *в* следует, что внутри магнитосферы сохраняется лишь небольшая область, где скорость V_x мала

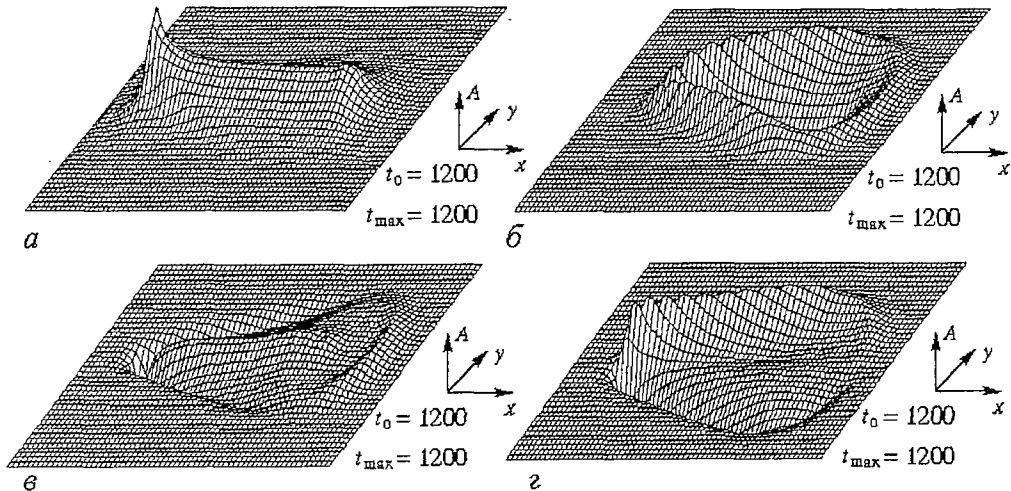


Рис. 4. МГД-переменные стационарной магнитосферы, возникшей в процессе обтекания Земли потоком плазмы солнечного ветра

и куда поток не проникает. Поперечное разбегание потока показано на рис. 4, *г* распределением скорости V_y .

Представленная на рис. 4 ситуация является исходной для изучения рассеяния набегающего возмущения, динамика которого показана на рис. 5 для плотности плазмы. На рис. 5, *а* локализованное вдоль и протяженное поперек волновое возмущение подходит к магнитосфере; рис. 5, *б* соответствует моменту непосредственного взаимодействия, когда влияние набегающего возмущения на центральную область магнитосферы максимально. На рис. 5, *в* показано, как профиль магнитосферы восстановился, а возмущение сместилось в хвост модельной магнитосферы.

Особый интерес представляет динамика магнитного поля при прохождении возмущения через область магнитосферы, вызывающая «внезапный импульс» (SI). Последовательность кадров, отвечающих этому процессу, представлена на серии рис. 6. Видно, как натекающее возмущение вызывает ощутимый подъем

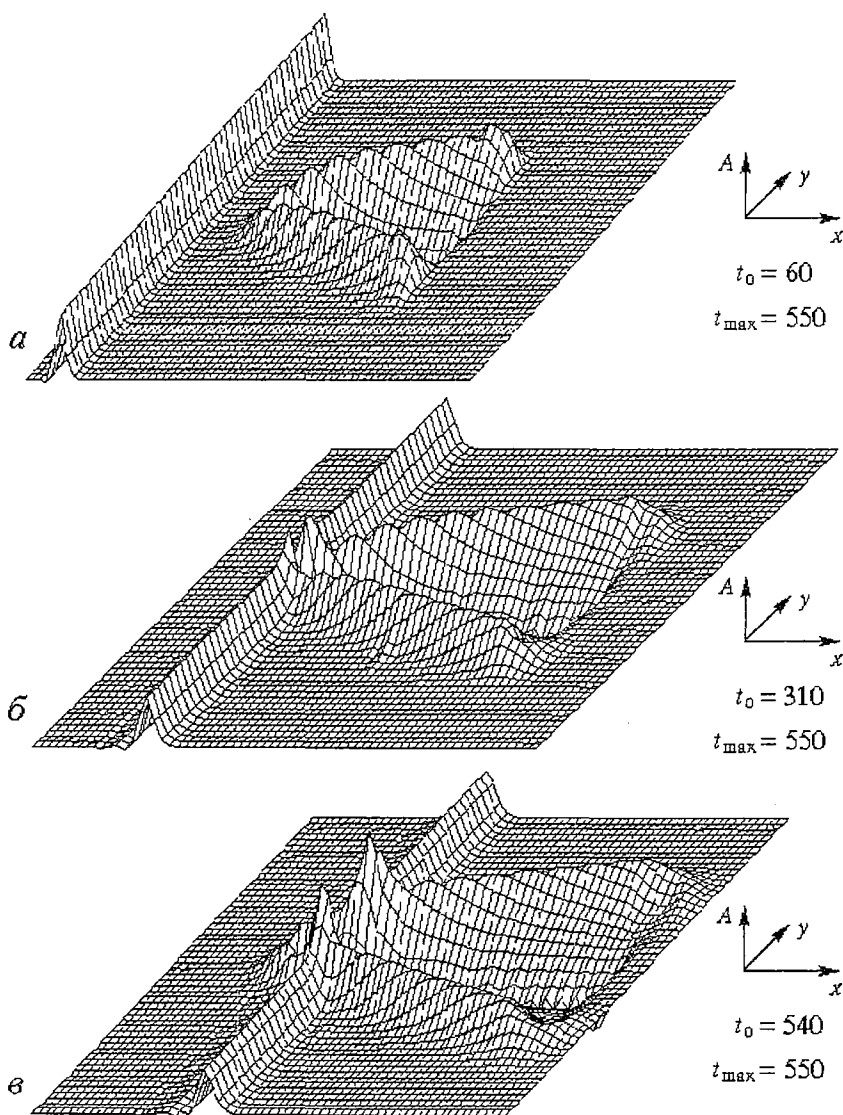


Рис. 5. Распределение плотности плазмы на этапах прохождения волнового возмущения через магнитосферу

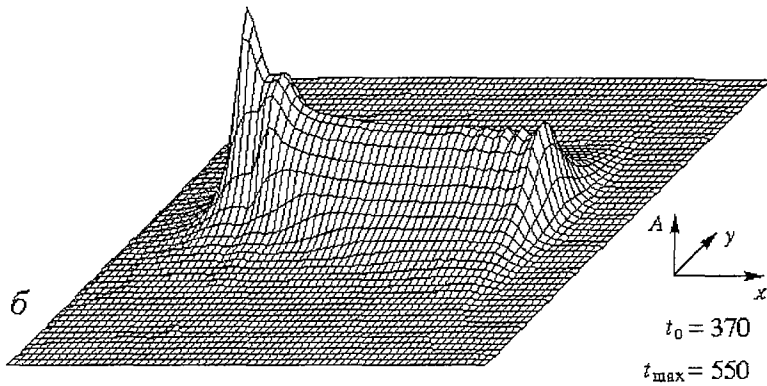
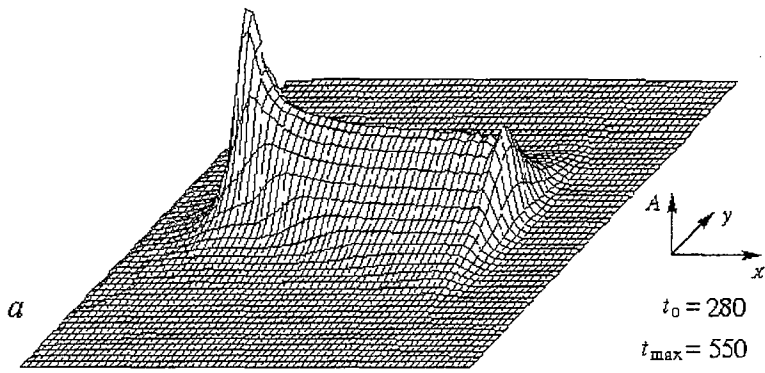


Рис. 6. Возмущения магнитного поля в центральной области магнитосферы и в хвосте

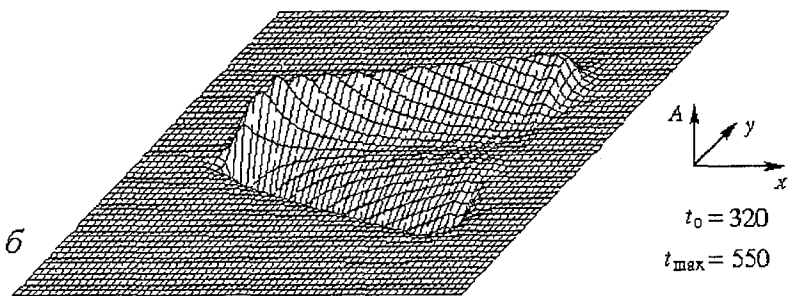
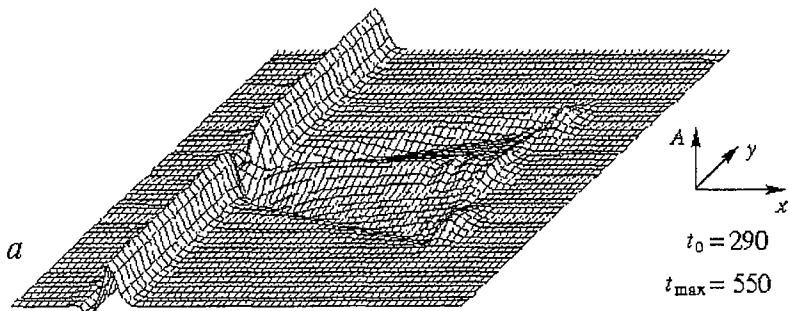


Рис. 7. Распределения продольной и поперечной скоростей плазмы в момент прохождения возмущения через центральную часть магнитосферы

геомагнитного поля в задней части центральной области магнитосферы (рис. 6, а). Он не превышает нескольких процентов от стационарного значения в момент наибольшего прохождения возмущения. На периферии, в хвосте магнитосферы влияние сносимого возмущения в доленом отношении проявляется более отчетливо, поскольку там слабее земное стационарное магнитное поле (рис. 6, б).

На рис. 7 показаны распределения продольной и поперечной скоростей при прохождении возмущения через магнитосферу. Сравнение с рис. 4, в и рис. 4, г показывает ощутимое влияние возмущения на распределение скоростей в этот момент.

Выводы

В настоящей работе показано, что созданная нами компьютерная программа успешно реализует моделирование МГД-процессов в космической плазме. Поставленные численные эксперименты иллюстрируют основные особенности взаимодействия плазмы и магнитного поля. Продемонстрировано возникновение диамагнитного плазменного статического объекта, сопровождаемое звуковым волновым процессом. Рассмотренный модельный пример рассеяния плоского возмущения на этом объекте является частным случаем общезначимой задачи рассеяния плоской волны на пространственно локализованной неоднородности среды.

Созданная программа позволяет выяснить различные особенности картины взаимодействия неоднородного солнечного ветра с модельной магнитосферой Земли. Полученные в вычислительных экспериментах результаты могут быть использованы для объяснения связи параметров возмущений космической среды и вариаций геомагнитного поля. В рамках рассмотренной модели магнитосферы показано, что двухкратное возрастание плотности в потоке солнечного ветра может вызывать «внезапный импульс» SI - изменение на несколько процентов магнитного поля во внутренней области магнитосферы. Разработанная методика анализа взаимодействия неоднородностей солнечного ветра с магнитосферой оказалась полезной для оценки геоэффективности различных типов возмущений, обусловленных солнечной активностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-05-64689) и научной программы «Университеты России».

Библиографический список

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.
2. Лэмб Г. Гидродинамика. М.: Гостехиздат, 1947. 343 с.
3. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.
4. Электродинамика плазмы. Под ред. Ахизера А.И. М.: Наука, 1974. 720 с.
5. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Астахов В.В. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 368 с.

*Нижегородский государственный
педагогический университет
Научно-исследовательский
радиофизический институт*

Поступила в редакцию 19.01.01

DYNAMICS OF NONLINEAR INTERACTION BETWEEN INHOMOGENEITIES OF SOLAR WIND FLOW AND THE EARTH MAGNETOSPHERE

Barkhatov N.A., Belliustin N.S., Emel'yanov N.N.

The process of flow of Solar wind plasma over the localized barrier such as the Earth magnetic field is studied by the numerical methods. The research is carried out in magnetohydrodynamic approach. Nonstationarity of such interaction is occasioned by inhomogeneities of the coming flow, transient and wave processes, which are caused by instabilities of medium movement, as well. The computer program of two-dimensional computing magnetohydrodynamic simulation was created for the research of these problems. This program allows to review quickly the one-dimensional computing dynamic process scenario for the selection of parameters. The model interaction of the Earth magnetosphere with density and velocity inhomogeneity in the Solar wind was demonstrated by the program. It was shown, that the model two-dimensional disturbance penetrates into magnetosphere region. It creates the noticeable change of the Earth magnetic field there. Problems, connected with random regimes because of time and space discrete of computing model were solved.



Бархатов Николай Александрович - родился в Горьком (1948). Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1971), аспирантуру ИЗМИР АН (Троицк, Моск. обл.). Работает в Научно-исследовательском радиофизическом институте (с 1978 г.) и в Нижегородском государственном педагогическом университете (с 1986 г.). Доктор физико-математических наук (1997). Профессор (1998) кафедры теоретической физики. Соросовский профессор. Тема кандидатской диссертации - «Ультранизкочастотные волны в солнечном ветре и магнитосфере земли» (1981); докторской - «Распространение магнитогидродинамических возмущений в солнечном ветре и околоземном пространстве» (1997). Опубликовал около 100 научных работ по вышеуказанным направлениям, а также в области моделирования и прогнозирования динамических процессов в космической плазме с использованием средств компьютерного моделирования и методов искусственных нейронных сетей. В НГПУ читает курсы: «Теоретическая физика - Электродинамика», «Электрорадиотехника», «Волновые явления в космической плазме», «Солнечно-земная физика».



Беллустин Николай Сергеевич - родился в Горьком (1950). Окончил с отличием радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1972), работает в Научно-исследовательском радиофизическом институте. Кандидат физико-математических наук (1978), старший научный сотрудник (1991). Тема кандидатской диссертации: «Некоторые вопросы распространения и излучения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме». Опубликовал около 65 научных работ по вышеуказанным направлениям, а также в области теории искусственных нейронных сетей и их применения для обработки визуальных изображений и для прогнозирования и моделирования сложных динамических систем, в том числе финансово-экономических процессов.



Емельянов Николай Николаевич - родился в Горьком (1978). В настоящее время - студент 5-го курса (магистратура) физического факультета Нижегородского государственного педагогического университета.