

Связь между величинами, входящими в уравнение баланса энергии, в начальной стадии развития ветрового волнения. Расчеты выполнены по данным, заимствованным из работ [1] — 1, [2] — 2, [3] — 3, [4, 8] — 4, [5] — 5, [6] — 6, [7] — 7. Сплошная линия соответствует соотношению  $W + W_{\mu} = W_a + \tau_w c$

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 96-05-64547), Федеральной целевой программы

(ФЦП) «Интеграция» (грант 2.1-304) и подпрограммы ФЦП «Комплексные исследования океанов и морей, Арктики и Антарктики».

#### Литература

1. Сперанская А.А. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1984.
2. Lin I.T., Nak M.G. // J. Geophys. Res. 1984. **89**. P. 627.
3. Лесников Б.М. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1975.
4. Wu J. // J. Fluid Mech. 1975. **68**. P. 49.
5. Bye I.A.T. // Limnology and Oceanogr. 1965. **10**. P. 451.
6. Shemdin O.H. // J. Phys. Oceanogr. 1972. **2**. P. 411.
7. Лейкин И.А., Показеев К.В., Розенберг А.О. // Изв. АН СССР, ФАО. 1984. **20**, № 4. С. 297.
8. Hsu C.T., Wu H.Y., Hsu E.Y., Street R.L. // J. Phys. Oceanogr. 1982. **12**. P. 929.
9. Кононова Г.Е. Динамика морских волн. М., 1969.
10. Доброклонский С.В. // ДАН СССР. 1947. **58**, № 7. С. 1345.
11. Капица П.Л. // Там же. 1949. **64**, № 4. С. 12.
12. Jeffreys H. // Proc. Roy. Soc. (L). 1925. **A107**. P. 189.
13. Шулейкин В.В. Физика моря. М., 1953.
14. Sverdrup H.U., Munk W.H. U.S. Hydrogr. Office Publ. No. 601. Washington, 1947.
15. Motzfeld H. // Z. Angew. Math. Mech. 1937. **17**. P. 193.
16. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л., 1970.
17. Анисимова Е.П., Показеев К.В., Соболева Н.И., Сперанская А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 3. С. 51 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 3).

Поступила в редакцию  
10.06.98

УДК 551.510.5, 501.7; 537.87, 621.371

## ВЛИЯНИЕ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ СРЕД В РАДИОЗАТМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

В. И. Захаров, В. Е. Куницын

(кафедра физики атмосферы)

Показано, что возникновение многолучевости в сложных случаях распространения сигнала на трассе спутник–спутник вносит дополнительные искажения в восстанавливаемые профили параметров сред. Разделение лучей по времени прибытия позволяет уверенно отфильтровывать отраженный от Земли луч. Влияние многолучевости локально, оно зависит от геометрии эксперимента. Для профилей электронной концентрации диапазон ошибок, связанных с влиянием многолучевости, составляет не более 10–12%. Характерно, что по высоте области проявления ошибок ограничены и могут интерпретироваться как волновые структуры.

#### Введение

Метод рефрактометрического радиопросвечивания как источник информации о зависимости коэффициента преломления от высоты успешно применялся при исследованиях планетных атмосфер [1–3]. При мониторинге земной атмосферы и ионосферы важны вариации параметров этих сред, поэтому требования к точности определения самих параметров возрастают [4–6]. Использование для этих целей глобальных спутниковых навигационных систем, напри-

мер GPS и ГЛОНАСС, в настоящее время выявило ряд сложностей при серийном получении данных и их интерпретации.

Источником проблем является влияние неоднородных структур сред, в которых распространяется сигнал (протоносфера, ионосфера и атмосфера), на точность восстановления регулярных параметров самих сред. Так, в «неблагоприятных» условиях возможно затенение атмосферных структур ионосферными, т. е. динамика возмущений в ионосфере наклад-

дывается на атмосферные вариации [6]. В ряде случаев возникает многолучевое распространение зондирующего излучения, что приводит к перекрещиванию лучей и возникновению биений. Технически проблема селекции лучей в системе типа GPS связана с приемом двух частот:  $f_1$  и  $f_2$ , равных 1,57 и 1,22 ГГц в угле раскрытия не менее  $120^\circ$  при неидентичном коэффициенте усиления антенны для различных рабочих частот. Кроме того, зависимость усиления от азимутального угла для различных частот разная [7].

Цель настоящей работы — моделирование и общезначимый анализ влияния многолучевости в разных упрощенных ситуациях (учет двух лучей) на точность восстановления параметров сред распространения в рефрактометрических экспериментах. Причинами возникновения второго луча могут быть несколько процессов, например отражение от Земли, от ионосферных неоднородностей при наклонном скольжении падения, а также от атмосферных неоднородностей, связанных со сложной структурой поля влажности в различных географических условиях, и т. д. В настоящей работе рассматриваются лишь две из этих причин — отражение от Земли и отражение от ионосферных неоднородностей. Так, отражение от спорадического слоя с критической частотой  $f_c = 3\text{--}5$  МГц происходит в широком диапазоне частот порядка 1 МГц [8]. При скольжении угла падения (величина которого порядка отношения  $f_c/f \approx (2 \div 4) \cdot 10^{-4}$  рад =  $0,1 \div 0,2^\circ$ ) кроме прошедшего будет наблюдаться достаточно сильный отраженный сигнал. Так, может наблюдаться отражение от  $E$ - и  $F$ -слоев ионосферы, но здесь диапазон полупрозрачности существенно уже и возможно частичное отражение на частоте  $f_1$  при отсутствии отражения на частоте  $f_2$ . Появление многолучевости носит нерегулярный характер и определяется взаиморасположением неоднородности, источника и приемника.

### Моделирование многолучевого распространения

В настоящей работе, как и в [6], вариации углов рефракции  $\epsilon$  и оптического пути  $S$  волн, излучаемых GPS-спутником, определяются из уравнений для луча в двухмерной среде [9, 10]

$$\frac{d^2 r}{d\theta^2} = r + \frac{2}{r} \left( \frac{dr}{d\theta} \right)^2 + \left[ \frac{\partial n}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial n}{\partial \theta} \frac{dr}{d\theta} \right] \frac{1}{n(r, \theta)} \left[ r^2 + \left( \frac{dr}{d\theta} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$\frac{dS}{d\theta} = n(r, \theta) \left[ r^2 + \left( \frac{dr}{d\theta} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

с граничными условиями  $r(\theta_{LEO}) = r_{LEO}$ ,  $r(\theta_{GPS}) = r_{GPS}$ ,  $S(0) = 0$ , где  $r$  и  $\theta$  — координаты точки траектории луча. Здесь координаты GPS-спутника отмечены индексом «GPS», а координаты низкоорбитального ИСЗ (Low Earth Orbit) — индексом «LEO»,  $n(r, \theta)$  — показатель преломления среды. Геометрия эксперимента представлена на рис. 1. В зависимости

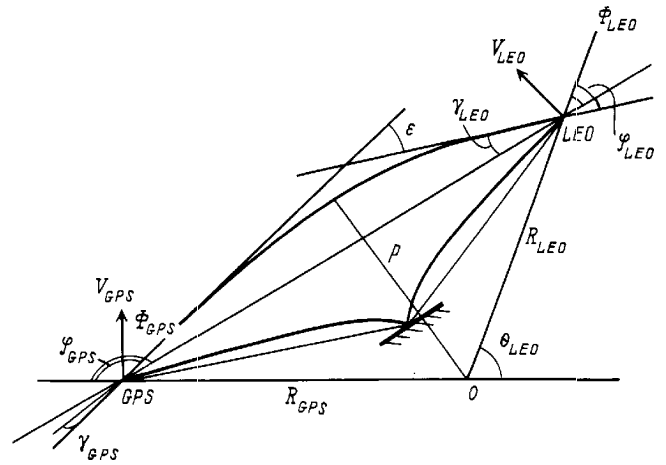


Рис. 1. Геометрия эксперимента

от разности углов  $\theta_{GPS}$  и  $\theta_{LEO}$  наблюдается восход GPS-спутника и определяется угол рефракции  $\epsilon$  в функции прицельного параметра  $p$  для каждой из частот  $f_i$ ,  $i = 1, 2$ . Для второго, отраженного луча траектория и аналогичные параметры определяются из системы (1), (2).

Зависимость  $n(r, \theta)$  выбиралась в виде

$$n(r, \theta) = 1 + 10^{-6} \left[ N_{atm}(r) + \delta N_{atm}(r, \theta, \dots) - \frac{f_c^2}{f^2} \frac{N_e(r) + \delta N_e(r, \theta, \dots)}{N_{e\max}(r)} \right], \quad (3)$$

где  $N_{atm}(r)$  — зависимость коэффициента регулярной рефракции атмосферы от высоты, а  $N_e(r, \dots)$  — ход электронной концентрации в ионосфере. В аргументах точками обозначены положение и параметры неоднородности;  $f_c$  — критическая частота,  $N_{e\max}$  — максимальная электронная концентрация для соответствующего слоя.

При численном решении (1), (2) с учетом (3) можно использовать различные модели регулярных и неоднородных структур. В настоящей работе принят экспоненциальный профиль для индекса рефракции атмосферы, высота однородной атмосферы 7 км,  $N(0) = 287$  N-ед. Регулярные профили электронной концентрации выбирались в виде комбинаций простых слоев Чепмена при моделировании  $F2$  и  $E$  ионосферных слоев, расположенных на высотах  $250 \div 350$  и  $100 \div 150$  км, с полутолщинами  $100 \div 150$  и  $10 \div 25$  км и максимумом электронной концентрации  $N_{e\max} = 2 \cdot 10^6$  и  $2 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^6$  см $^{-3}$  соответственно.

Возмущения в атмосфере и ионосфере учтены в (3) членами  $\delta N(\dots)$  с соответствующими индексами. В работе считалось, что при отражении действие неоднородности на зондирующую волну эквивалентно действию плоского зеркала с коэффициентом отражения, равным коэффициенту отражения соответствующего ионосферного образования [8]. Положение центра возмущения над Землей имеет координаты  $h_{inh}, \theta_{inh}$ . Параметры неоднородностей приведены в таблице.

Параметры неоднородностей	Ионосфера
1. Положение $h_{inh}$ , км $\theta_{inh}$ , град	80 ÷ 600 перигей луча $\pm 20^\circ$
2. Размеры $\Delta r_{inh}$ , км $\Delta \theta_{inh}$ , град (или $a_{inh}$ и $b_{inh}$ , км)	1 ÷ 25 0,5 ÷ 10 (150 ÷ 300 и 5 ÷ 30)
3. Интенсивность	(0,01 ÷ 0,75) $N$

В ходе моделирования, получившего в литературе название «end-to-end modeling» [5], для заданного положения спутников рассчитывалась зависимость доплеровского смещения частоты  $\Delta f$  от прицельного параметра луча  $p$  с шагом по высоте менее 100 м в атмосфере и  $\sim 1$  км в ионосфере ( $h > 60$  км) для лучей с частотами  $f_1$  и  $f_2$ . Ошибка по координате  $r$  при решении уравнений (1), (2) с учетом (3) и данных таблицы составляет не более 2 см для обоих лучей.

В сферически слоистой среде углы  $\varphi_{LEO}$  и  $\varphi_{GPS}$  связаны соотношением (см. рис. 1)

$$n_{GPS} R_{GPS} \sin(\varphi_{GPS}) = n_{LEO} R_{LEO} \sin(\varphi_{LEO}), \quad (4)$$

где  $\varphi_{LEO} = \Phi_{LEO} - \gamma_{LEO}$  и  $\varphi_{GPS} = \Phi_{GPS} - \gamma_{GPS}$ .

Сдвиг  $\Delta f$  частоты зондирования  $f$ , наблюдаемый в прямом эксперименте и определяемый только рефракцией, можно рассчитать согласно [10]:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{c - V_{LEO} n_{LEO} \sin(\varphi_{LEO})}{c - V_{GPS} n_{GPS} \sin(\varphi_{GPS})} \sqrt{\frac{1 - (V_{GPS} n_{GPS}/c)^2}{1 - (V_{LEO} n_{LEO}/c)^2}} - \frac{c - V_{LEO} n_{LEO} \sin(\Phi_{LEO})}{c - V_{GPS} n_{GPS} \sin(\Phi_{GPS})} \sqrt{\frac{1 - (V_{GPS} n_{GPS}/c)^2}{1 - (V_{LEO} n_{LEO}/c)^2}}. \quad (5)$$

По формуле (5) определялись доплеровские сдвиги частоты зондирования ( $f_i$ ,  $i = 1, 2$ ) для прямого луча, отраженного от Земли и от ионосферной неоднородности. В последнем случае учитывалась скорость дрейфа неоднородной структуры (зеркала); в настоящих расчетах принималось, что наиболее вероятная скорость движения неоднородной структуры составляет 50 ÷ 300 м/с [11], и формулы для доплеровских сдвигов, аналогичные (5), ввиду их громоздкости здесь не приводятся.

При смещении лучей считалось, что из-за широкой диаграммы направленности приемной антенны они складываются скалярно. Это приводит к модуляции принимаемого сигнала; глубина модуляции пропорциональна отношению амплитуд лучей, а бинения происходят на комбинационных частотах. Рефракционное ослабление электромагнитных волн в радиозатменных экспериментах рассмотрено, например, в работе [12]. В нашей работе использованы данные [12] для оценки отношения амплитуд лучей. Величины постоянных фазовых набегов учитывались с помощью рассчитанных по (2) оптических путей при решении прямой задачи.

Компенсация влияния ионосферы при восстановлении атмосферного профиля осуществлялась по двухчастотному методу [10]:

$$\varepsilon = \frac{f_1^2 \varepsilon_1 - f_2^2 \varepsilon_2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_i$  — угол рефракции в атмосфере луча частоты  $f_i$ ,  $i = 1, 2$ . Известная зависимость  $\varepsilon_i(p)$  использовалась для восстановления  $n(r)$  [1–3]:

$$n_i(x) = \exp \left[ \frac{1}{\pi} \int_x^H \frac{\varepsilon(p) dp}{\sqrt{p^2 - x^2}} \right], \quad x = r n(r), \quad (7)$$

где  $H$  — верхняя условная граница среды. Вертикальный профиль показателя преломления  $n_i(r)$  соответствует точкам перигеев лучей.

Затем решалась обратная задача — по полученным доплеровским сдвигам частоты восстанавливался угол рефракции  $\varepsilon$  как решение системы (4), (5), а затем по (7) — профиль  $n(h)$ . Моделирование проводилось для двух разных частот зондирования, что дало возможность использовать выражение (6) для коррекции влияния ионосферы. Полученные профили  $n(h)$  сравнивались с модельными.

### Основные результаты

Проведенное «end-to-end» моделирование позволило проанализировать влияние различных ситуаций, в которых возникает многолучевость, на точность восстановления профилей. Наличие многолучевости, в принципе, может быть выявлено путем анализа доплеровского спектра принимаемого сигнала. Кроме того, для прямого луча время распространения сигнала минимально, что может быть использовано при обработке.

**1. Отражение от Земли.** На рис. 2 изображены зависимости доплеровского сдвига частоты для прямого и отраженного от Земли лучей в случае

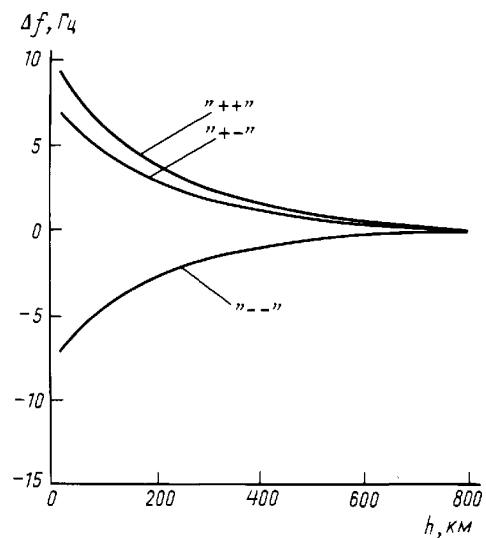


Рис. 2. Доплеровские сдвиги частот зондирующего сигнала, отраженного от Земли при различном направлении движения спутников

отсутствия неоднородностей в ионосфере и атмосфере при различных направлениях скоростей спутников («++» — спутники двигаются навстречу в плоскости рис. 1, «--» — спутники «разлетаются», «+-» — спутник LEO следует за GPS, «-+» — GPS за LEO). Видно, что доплеровский сдвиг частоты зондирующего сигнала GPS для земного луча не превышает нескольких герц, т.е. составляет от нескольких процентов до десятков процентов от значения регулярно доплеровского сдвига, причем для ионосферы относительная величина сдвига больше, чем для атмосферы. Проведенный анализ показывает, что земной луч может оказывать влияние на профиль на высотах свыше 60 км. Разность оптического хода прямого и отраженного от Земли луча составляет менее 1–2 км, или по времени — менее 10 мкс.

По оценкам, амплитуды этих лучей отличаются не более чем на 3 дБ при зеркальном отражении от Земли. Амплитуда отраженного от Земли луча в основном связана со свойствами земной поверхности в области отражения и, в принципе, может быть изучена в других схемах экспериментов с использованием различных навигационных систем [13]. В наших условиях отраженный от Земли луч ухудшает точность восстановления ионосферного профиля. Усреднение сигнала по времени в типичных ситуациях может уменьшить влияние многолучевости при снижении пространственного разрешения. Расчеты показывают, что временной интервал 2–3 секунды оптимален для усреднения биений, вызванных отраженным лучом. Кроме того, значительный временной промежуток между появлением прямого и отраженного сигналов позволяет их разделить.

**2. Отражения от ионосферных структур.** С высокой степенью точности отражение от ионосферной неоднородности можно заменить отражением от плоского полупрозрачного зеркала, размеры которого соответствуют размерам наблюдаемых в различных экспериментах (напр., [11]) неоднородных структур, движущихся с характерной скоростью и имеющих различные коэффициенты отражения.

Принципиальным отличием этого случая от предыдущего является возможность влияния многолучевости на восстанавливаемый профиль в выбранном диапазоне высот в зависимости от положения и ориентации неоднородности. Однако ограничение размера неоднородности приводит к локальному влиянию на изучаемый профиль. При учете движения неоднородности доплеровские сдвиги изменяются менее чем на 10% при различных ориентациях неоднородной структуры относительно зондирующего луча. Оптическая разность хода прямого и отраженного лучей может варьироваться в широких пределах — от нескольких метров до нескольких километров в зависимости от положения и ориентации неоднородности. Кроме того, в ионосфере могут существовать слоистые образования и волновые структуры, фокусирующие волну. Поэтому разделение лучей по времени прибытия в ряде случаев невозможно, в связи с чем важны соотношения амплитуд лучей при их обработке приемной системой [7]. Усреднение

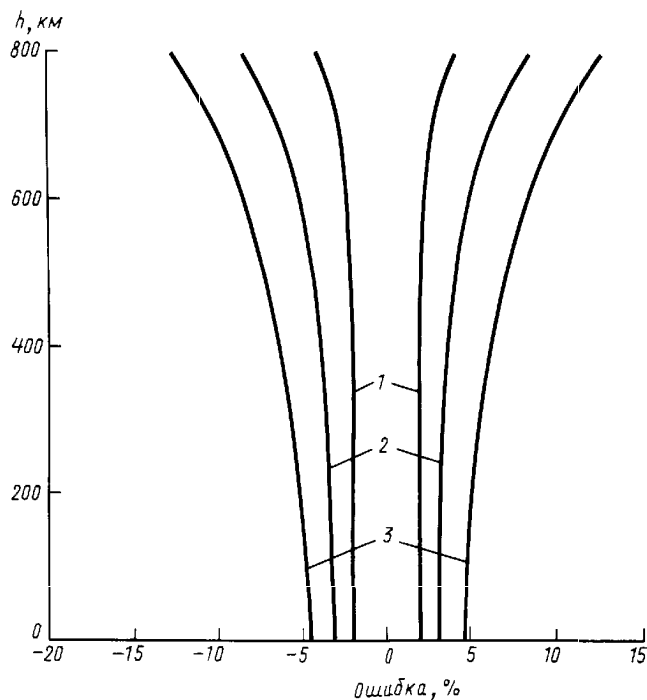


Рис. 3. Диапазон ошибок при реконструкции атмосферных и ионосферных профилей в случае многолучевого распространения при отношении амплитуды второго луча к амплитуде первого, равном 0,1 (1); 0,5 (2) и 1 (3)

требует большого времени (не менее 10 с) и приводит к потере пространственного разрешения.

На рис. 3 представлены диапазоны возможных ошибок при различных ориентациях ионосферных неоднородностей в зависимости от отношения амплитуд лучей. Величина ошибок может достигать 12% на ионосферных высотах, относительные ошибки для атмосферных профилей составляют не более 2%. На рис. 4 приведен возможный вид профиля, восстановленного в эксперименте по рефрактометрии ионосферы в случае двухлучевого распространения при отражении второго луча от неоднородности с характерным линейным размером 100 км. Отметим, что селекция лучей по времени прихода не устраняет локального влияния неоднородности: ошибки восстановления при этом возрастают в области высот, большей области характерного высотного разрешения. Размер по высоте области, в которой проявляются ошибки, связанные с многолучевостью, достигает десятка километров при характерных линейных размерах неоднородностей до 200 км и при различных ориентациях неоднородности. Вид возмущения на реконструируемом профиле зависит не только от влияния неоднородной структуры, но и от частоты отсчетов (временного усреднения) самой приемной системы.

## Выводы

Возникновение многолучевости в сложных случаях распространения сигнала на трассе GPS–LEO вносит дополнительные искажения в восстанавливаемые профили. Разделение лучей по времени прибытия

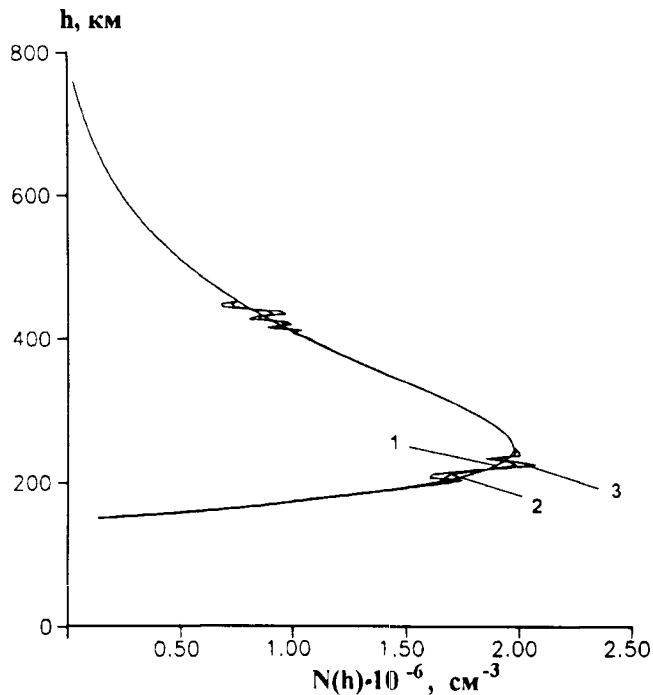


Рис. 4. Пример восстановления ионосферного профиля в случае отсутствия второго луча (1) и в случае многолучевого распространения при отношении амплитуды второго луча к первому, равном 0,5 (2) и 1 (3)

тия позволяет уверенно отфильтровывать отраженный от Земли луч. Влияние многолучевости локально и зависит от геометрии эксперимента. При этом для ионосферных профилей диапазон ошибок составляет не более 10–12%; характерно, что области проявления ошибок по высоте ограничены и могут интерпретироваться как волновые структуры. Увеличение точности определения параметров атмосферы и ионосферы Земли возможно в случае комплекс-

ной диагностики сред, в которых распространяется зондирующее излучение, при получении информации разными методами спутникового и наземного мониторинга.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 98-05-64952) и Федеральной целевой программы «Интеграция» (грант А0116).

#### Литература

1. Phinney R.A., Anderson D.L. // J. Geophys. Res. 1968. **73**, No. 5. P. 1819.
2. Татарский В.И. // Изв. АН СССР, ФАО. 1968. **4**, № 8. С. 811.
3. Яковлев О.И. Распространение радиоволн в космосе. М.: Наука, 1985.
4. Горбунов М.Е. // Изв. РАН, ФАО. 1994. **30**, № 6. С. 776.
5. Hoeg P., Syndergaard S., Hauchecorne A. et al. Derivation of Atmospheric Properties Using a Radio Occultation Technique: ESA Rep. ESTEC/11024/94/NL/CN. Copenhagen, Denmark, 1995.
6. Куницын В.Е., Захаров В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 4. С. 45 (Moscow University Phys. Bull. 1998. No. 4).
7. Silvestrin P. // II URSI Intern. Work Shop for AFG1. Feb. 1996.
8. Куницын В.Е., Усачев А.В. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1988. **28**, № 5. С. 855.
9. Гурвич А.С., Соколовский С.В. // Изв. АН СССР, ФАО. 1988. **21**, № 1. С. 12.
10. Воробьев В.В., Красильникова Т.Г. // Изв. РАН, сер. физ. 1993. **29**, № 5. С. 626.
11. Mendillo M., Baumgardner J., Aarons J. // Ann. Geophys. 1987. **5A**, No. 6. P. 543.
12. Яковлев О.И., Вилков И.А., Гришмановский В.А. и др. // Радиотехн. и электроника. 1992. **37**, № 1. С. 42.
13. Павельев А.Г., Захаров А.И., Кучерявенков А.И. и др. // Радиотехн. и электроника. 1997. **42**, № 1. С. 51.

Поступила в редакцию  
24.06.98

## АСТРОНОМИЯ

УДК 523.98 + 523.745

### О ПРИРОДЕ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ

С. А. Богачев, Б. В. Сомов

(ГАИШ)

Показано, что корональный источник жесткого рентгеновского излучения солнечной вспышки образуется при столкновении потока плазмы из пересоединяющего токового слоя с магнитным препятствием. Накопление пересоединенного магнитного потока за фронтом волны объясняет наблюдаемую скорость движения источника.

#### Введение

Наблюдения Солнца при помощи рентгеновских телескопов на ИСЗ *Yohkoh* выявили особенности в структуре солнечных вспышек, свидетельствующие о магнитном пересоединении как механизме вспышки (см. обзор [1]). Такой особенностью является, в частности, корональный источник жесткого рентге-

новского излучения [2]. Он располагается над вспышечной петлей, наблюдаемой в мягком рентгеновском излучении, что согласуется с общей картиной пересоединения во вспышках (см. работу [3]). В ряде публикаций высказывалось предположение, что источник может нагреваться ударной волной, порождаемой потоком плазмы из области пересоединения.