

МОДЕЛЬ ХРОМОСФЕРЫ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ ПО ДАННЫМ О МИЛЛИМЕТРОВОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Е.Я. Злотник

Институт прикладной физики АН СССР, Горький, СССР

АБСТРАКТ. Рассмотрены особенности частотного спектра локальных источников радиоизлучения, связанных с активными областями на Солнце, в миллиметровом диапазоне волн. Исследованы физические условия в хромосфере, которые определяют формирование спектров типичных источников повышенного излучения. Показано, что распределения по высоте кинетической температуры и электронной концентрации, принятые в ряде обсуждаемых в литературе моделей хромосферы над пятном, приводят к завышенным (по сравнению с наблюдениями) значениям яркостной температуры на миллиметровых волнах. Обсуждаются изменения, которые необходимо внести в существующие модели, чтобы добиться лучшего совпадения с данными наблюдений локальных источников в миллиметровом диапазоне.

MODEL OF CHROMOSPHERE ABOVE THE ACTIVE REGION BASED ON MILLIMETER WAVE OBSERVATIONS: Millimetre wave spectra of local radio sources above the solar active regions are investigated. Physical conditions of chromosphere, under which spectra of typical sources of increased emissivity are formed, are specified. It is shown that the distributions of kinetic temperature and electron density in height now adopted in several models of chromosphere above the spot lead to over-estimated (as compared with observations) brightness temperature at millimeter waves. Corrections to existing models for better agreement with observations of millimetre wave local sources are discussed.

MODEL CHROMOSFÉRY NAD AKTÍVNOU OBLASŤOU PODĽA ÚDAJOV O ŽIARENÍ NA MILIMETROVÝCH VLNÁCH: V práci sú analyzované údaje o rádiovkej emisii v milimetrovom intervale vlnových dĺžok, ktorá vzniká nad aktívnymi oblasťami na Slnku. Špecifikované sú fyzikálne podmienky, pri ktorých vznikajú tieto zdroje zvýšenej emisie. Bolo zistené, že jasová teplota v milimetrovej oblasti vln, vypočítaná zo súčasných modelov chromosféry nad škvrnou (výškový priebeh kintickej teploty a elektrónovej hustoty) je oveľa vyššia ako odpovedá pozorovaniám. Diskutované sú potrebné zmeny v modeloch, ktoré by viedli k lepšej zhode pozorovaní na milimetrových vlnách s vypočítanými hodnotami.

Целью настоящего доклада является обсуждение той роли, которую может сыграть в построении модели активной области данные о радиомлучении локальных источников на Солнце на миллиметровых волнах. В отличие от сантиметрового диапазона, где основная роль в генерации радиоизлучения локальных источников (S-компонента) принадлежит циклотронному излучению тепловых электронов в хромосфере и короне над пятнами, миллиметровое излучение обязано своим происхождением (в предположении тепловой природы источника) тормозному механизму.

Наблюдения показывают, что при переходе от сантиметрового к миллиметровому наклон частотного спектра, как правило, меняет знак: падение потока от максимума (на волнах $\lambda \sim 6-10$ см) в сторону коротких волн сменяется нарастанием на волнах $\lambda \sim 0,8-2,0$ см (см., например, Стеффен, 1980, Рябов, 1983). Характерный спектр источника сантиметрового и миллиметрового излучения изображен схематически на Рис. 1. Форма перехода (узкий минимум или наличие сравнительно

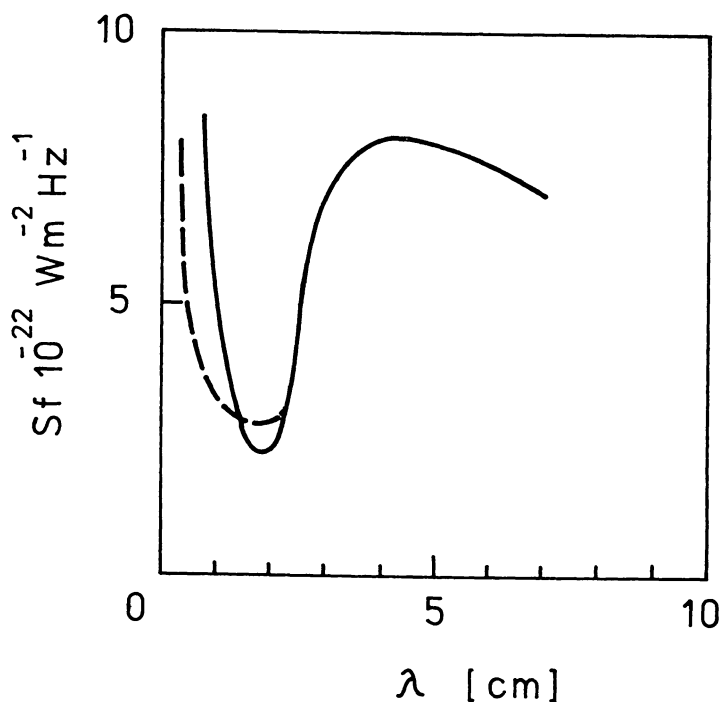


Рис. 1: Характерные спектры локальных источников миллиметрового и сантиметрового излучения.

протяженного плоского участка) определяется тем, какая часть солнечной атмосферы - оптически толстая хромосфера или оптически тонкая корона - вносит основной вклад в тормозное излучение на волнах, приближающихся снизу к волне λ_B , начиная с которой действует циклотронный механизм (см. подробнее, Злотник, (1986).

На миллиметровых волнах $\lambda \sim 1-8$ мм поток локальных источников, так же как

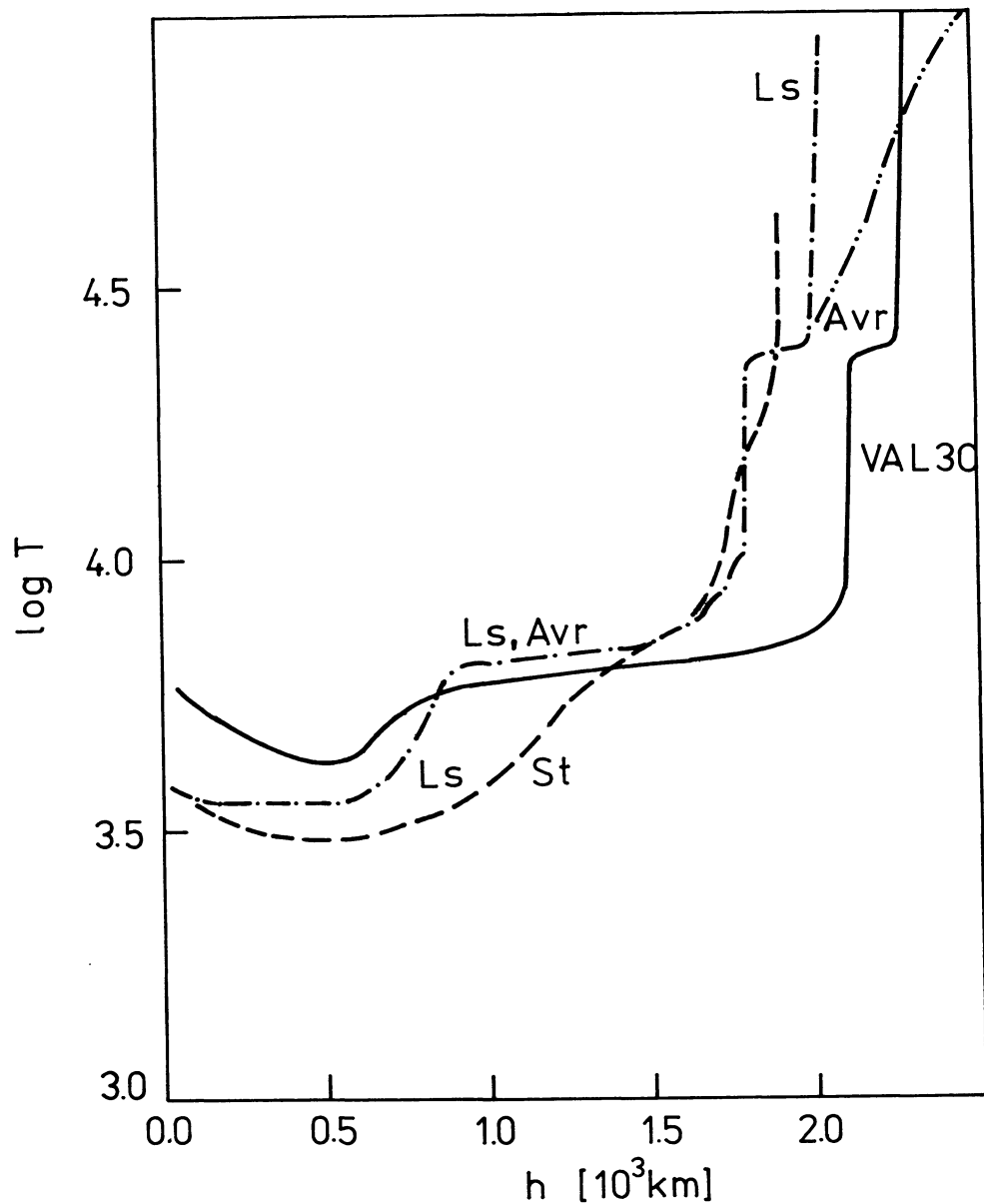


Рис. 2: Распределение температуры (а) и электронной концентрации

и поток спокойного Солнца, увеличивается с уменьшением длины волны (по данным Кислякова, 1970, Ефанова и др., 1972 а, в, 1973, Рябова, 1983). Источники, как правило, мало контрастны: для областей, в которых отсутствуют эффекты вспышечной активности, относительное превышение яркостной температуры над уровнем спокойного Солнца $\Delta T_b/T_0$ составляет не более 10 %. Если иметь в виду, что в

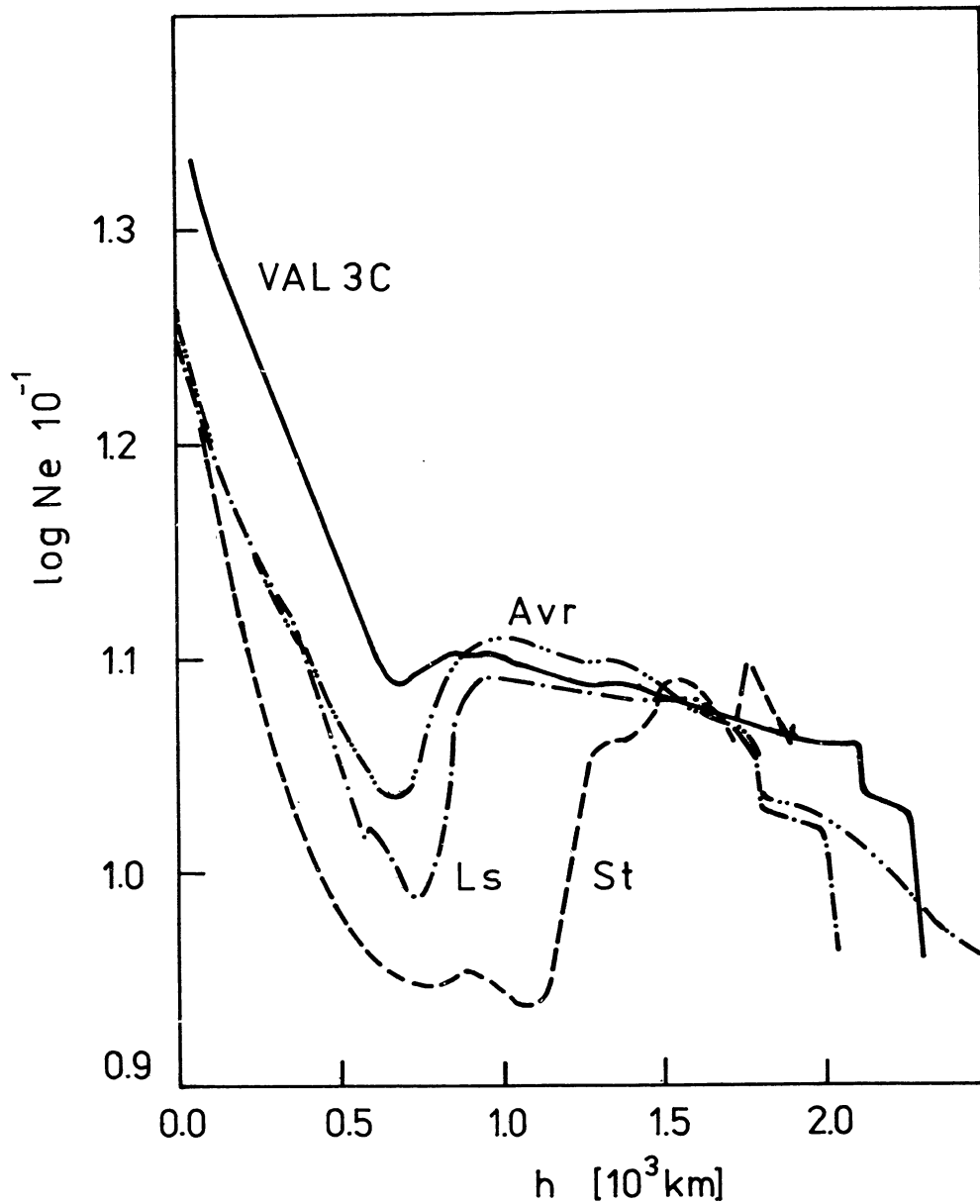


Рис. 2: Распределение температуры (б) по высоте для спокойного Солнца и для области над пятном
 T - в единицах $^{\circ}\text{K}$, N_e - в единицах cm^{-3} .

диапазоне 1-9 мкм для спокойного Солнца $T_e \sim (6-9) \times 10^3 \text{ }^{\circ}\text{K}$, то яркостная температура локальных источников не превышает $10^4 \text{ }^{\circ}\text{K}$. Отсюда следует, что источник излучения) должен быть, вероятнее всего, расположен в хромосфере.

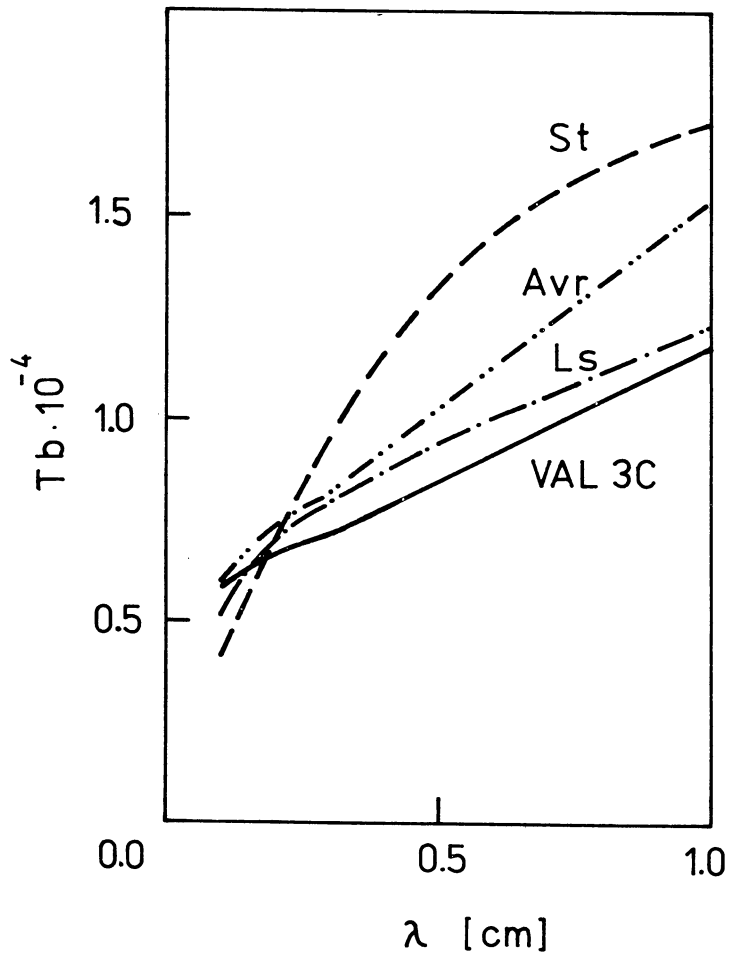


Рис. 3: Расчитанная зависимость яркостной температуры от длины волны в миллиметровом диапазоне для модели спокойного Солнца и трех моделей хромосферы над пятном

В настоящее время в литературе обсуждается ряд моделей хромосферы над пятнами, которые обеспечивают наблюдаемые данные оптического, ультрафиолетового, рентгеновского и сантиметрового излучения (Шимабукуро и др., 1973, Штауде и др. 1983, Лайтс и Скуманич, 1982, Эвретт, 1981). Ниже приведены расчеты теплового тормозного излучения хромосферы и переходного слоя в миллиметровом диапазоне для тех распределений температуры и концентрации электронов по высоте, которые предлагаются указанными моделями.

Рассмотрим сначала простейший случай - модель Шимабукуро и др., 1973. Поскольку в рамках этой модели хромосфера является оптически толстой на миллиметровых волнах как для активной области, так и для невозмущенных областей, то при одинаковой температуре активной области и окружающей хромосферы (что пред-

полагают Шимабукуро и др. 1973) локальные источники не должны были бы быть видны на фоне спокойного Солнца. Регистрация повышенного излучения активных областей в миллиметровом диапазоне свидетельствует о превышении кинетической температуры в областях над пятнами по сравнению со спокойным Солнцем. Этому требованию удовлетворяют модели LS (Лайтс и Скуманич, 1982), St (Штауде и др., 1983) и Avg (Эвретт, 1981), распределения температуры и электронной концентрации для которых приведены на Рис. 2а, б. Здесь же приведена модель спокойного Солнца VAL 3 C (Вернаца и др., 1981). Результаты расчета спектра тормозного излучения трех указанных моделей и спокойного Солнца приведены на Рис. 3.

Первое, что следует отметить на этих графиках, - это слишком высокие яркостные температуры по сравнению с наблюдаемыми. Это связано с тем, что значительный вклад в излучение вносит нижняя часть переходного слоя с кинетической температурой, достигающей 20000°K . Например, в модели St интервал высот, в котором оптическая толщина на волне 8 мм меняется в пределах от 0,1 до 1,0 составляет $(1,80 + 1,88) \cdot 10^3$ км (соответственно температура меняется от 15000°K до 20500°K). Существенное отличие спектров для моделей LS и Avg, отличающихся, главным образом, распределением температуры в переходном слое на высоте $h \gtrsim 2000$ км, также свидетельствует о том, что большая часть источника (по крайней мере, в длинноволновой части миллиметрового диапазона) расположена в переходном слое, где температура $T > 10^4$ К.

Отметим, что если источник расположен в области резкого градиента температуры, то даже небольшие отклонения в распределении температуры (как, например, в моделях LS и St) приводят к существенным отличиям в спектрах яркостной температуры миллиметрового излучения. В этом случае наблюдения на миллиметровых волнах были бы чувствительным индикатором правильности модели.

Очевидно, что для согласования с наблюдениями источников необходимо "опустить" в более холодные слои - хромосферу с температурой $T \lesssim 10^4$ К. Для этого надо уменьшить плотность электронов на высотах $h \sim (1,7 + 2,2)$ тыс. км, чтобы переходный слой был более оптически тонким. Распределение температуры и концентрации электронов на меньших высотах, ответственных за генерацию излучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона, также нуждается в уточнении. В качестве примера укажем на то, что по расчетам модели St источников на волне 1 мм представляет собой темное пятно на окружающем фоне. Указаний на регистрацию такого типа источников в литературе не имеется. Необходимо отметить, что частотный спектр, для величины $\Delta T_{\nu}/T_{\nu} = (T_{\nu} - T_{\nu 0})/T_{\nu 0}$ (относительного превышения яркостной температуры источника T_{ν} над уровнем спокойного Солнца $T_{\nu 0}$) - именно эта величина и определяется в первую очередь из наблюдений - может иметь разный характер в зависимости от отношения градиентов температуры и электронной концентрации в активных и невозмущенных областях. Наблюдения обнаруживают как монотонное нарастание и падение $\Delta T_{\nu}/T_{\nu}$ с длиной волны, так и спектры с максимумом (например, в районе 6 мм по наблюдениям на телескопе RT 25x2 в Зименках). Рассчитанные зависимости $\Delta T_{\nu}/T_{\nu}$ от λ для трех обсуждаемых моделей качественно отражает многообразие наблюдаемых спектров: в частности, для моделей LS и St величина $\Delta T_{\nu}/T_{\nu}$ имеет ход с максимумом на волне $\lambda \sim 4$ мм, в модели Avg величина $\Delta T_{\nu}/T_{\nu}$ растет с длиной волны. Однако рассчитанные значения $\Delta T_{\nu}/T_{\nu}$, так же как и яркостная температура T_{ν} , оказываются слишком

большими по сравнению с наблюдениями. Как указывалось выше, для обеспечения лучшего совпадения с данными наблюдений локальных источников на миллиметровых волнах необходимо, чтобы часть переходного слоя, примыкающая к хромосфере, была более оптически тонкой. Соответствующие расчеты будут опубликованы в другой статье.

Автор выражает благодарность Т.В. Бородачевой за помощь при проведении численных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

- Вернаца, Дж., Эвретт, Е., Лузер, Р.
(Vernazza, J.E., Avrett, E.H., Loeser, R.): 1981, *Astrophys. J. Suppl.* 45, 635.
- Ефанов, В.А., Кисляков, А.Г., Моисеев, И.Г. (Efanov, V.A., Kislyakov, A.G., Moiseev, I.G.): 1972а, *Solar Phys.* 24, 142.
- Ефанов, В.А., Кисляков, А.Г., Лебский, Д.В., Моисеев, И.Г., Наумов, А.И.: 1972в, *Изв. КРАО*, 44, 137.
- Ефанов, В.А., Куликов, В.Д., Моисеев, И.Г., Федосеев, Л.И.: 1973, *Изв. КРАО*, 48, 93.
- Злотник, Е.Я.: 1986, *Астрон. ж.* (в печати).
- Кисляков, А.Г.: 1970, *УФН*, 101, 607.
- Лайтс, Б., Скуманич, А. (Lites, B.W., (Lites, B.W., Skumanich, A): 1982, *Astrophys. J. Suppl.* 49, 293.
- Рябов, М.И.: 1983, кандидатская диссертация, Киев, ГАО АН УССР.
- Стеффен, П. (Steffen, P.): 1980, *Solar Phys.* 67, 89.
- Шимабукуро, Ф., Чэпмен, Г., Мейфилд, Е., Эдельсон, С. (Shimabukuro, F.I., Chapman, G.A., Mayfield, E.B., Edelson, S.): 1973, *Solar Phys.* 30, 163 163.
- Штауде, Я., Фюрстенберг, Ф., Хильдебрандт, Я., Крюгер, А., Якимец, Я., Обридко, В.Н., Царковский, М., Сильвестер, Б., Сильвестер, Я.: (Staudе, J., Fürstenberg, F., Hildebrandt J., Krüger, A., Jakimiec, J., Obridko, V.N., Siarkowski, M., Sylwester, B., Sylwester, J.): 1983, *Acta Astron.* 33, 441.
- Эвретт, Е. (Avrett, E.H.): 1981, in: L.E. Cram and J.H. Thomas (eds), *The Physics of Sunspots*, p. 235.

DISCUSSION

J. Hildebrandt

The results are very interesting for us, because we have also calculated mm-emission with our model. In which form did you use the given density and temperature distributions. Have you extrapolated them between significant points?

E. Ya. Zlotnik

We use different kinds of interpolations between the values of N_e given by

tables in models Avr, LS and St, but the results of calculations are practically not sensitive to different kinds of interpolation.

М.А. Мегилевский

Модель "St" неоднородна (тонкоструктурные филаменты). Можно-ли сравнивать однородную модель по мм-излучению с существенно неоднородной ?

Е.Я. Злетник

Можно, потому что по результатам мм наблюдений получаются только некоторые усредненные характеристики, тонкая структура и отдельные компоненты модели неразличимы. Возможно, что требуемые уменьшение плотности можно получить снижением относительной доли плотных элементов.

J. Staude

In the lower and middle chromosphere of sunspots the models could not yet determined unambiguously from optical line profiles, therefore your results from mm-radiation are of great interest for an improvement of models. We shall try to incorporate the proposed modifications in our model and compare predicted and calculated intensities, but also for other wavelengths, which should be explained as well. To which extent could the spatial resolution of the observations / 1/ influence the conclusions concerning the umbral atmosphere (we simultaneously observe the penumbra, plages etc.)?

Е. Я. Злетник

Все выводы сделанные по данным мм-наблюдения относятся к усредненной картине, мм не можем судить о распределении плотности электронов и температуры в разных элементах.