

УДК 523.945

## О динамике солнечных хромосферных спикул

Н. И. Пишкало

Астрономическая обсерватория Киевского университета имени Тараса Шевченко  
04053, Киев-53, ул. Обсерваторная 3

*Дается краткий обзор наблюдательных данных по хромосферным спикулам на лимбе и мелким узелкам на диске Солнца. Анализируются динамические характеристики спикул; особое внимание уделяется вопросу реальности движения вещества вдоль спикульной оси. Сделан вывод, что спикулы и узелки представляют собой проявления одного и того же солнечного образования, наблюдаемого на лимбе как спикула. Высказано предположение, что видимая вертикальная скорость за лимбом неадекватно представляет движение вещества вдоль продольного сечения спикулы. По-видимому, скорость продольного движения вещества в средней части спикулы, где обычно определяются лучевые скорости, может быть существенно ниже скорости движения вещества на верхушке спикульного выброса, по которой определяются видимые вертикальные скорости.*

*ПРО ДИНАМІКУ СОНЯЧНИХ ХРОМОСФЕРНИХ СПІКУЛ, Пішкало М. І. — Дасться короткий огляд спостережень хромосферних спікул на лімбі та дрібних вузликів на диску Сонця. Аналізуються динамічні характеристики спікул; особливу увагу приділено питанню реальності руху речовини вздовж спікульної осі. Зроблено висновок, що спікули та вузлики є проявами одного й того ж сонячного утворення, що спостерігається на лімбі як спікула. Зроблено припущення, що видима вертикальна швидкість спікул за лімбом неадекватно представляє рух речовини у поздовжньому перерізі спікули. Напевне, швидкість поздовжнього руху речовини у середній частині спікули, де звичайно визначаються променеві швидкості, може бути істотно нижчою від швидкості руху речовини на вершині спікульного викиду, де визначаються видимі вертикальні швидкості.*

*ON THE DYNAMICS OF SOLAR CHROMOSPHERIC SPICULES, by Pishkalo N. I. — A short review of observational data on chromospheric spicules at the limb and fine mottles on the disk of the Sun is given. Dynamical properties of spicules are analysed; special attention is paid to reality of the matter motion along a spicular axis. We conclude that the spicules and mottles are manifestations of the same solar phenomenon observed as a spicule at the limb. The visible vertical velocity beyond the limb is assumed to represent inadequately the real motion matter along the longitudinal section of a spicule. The velocity of longitudinal motion in the middle part of a spicule, where the radial velocities are usually measured, seems to be considerably smaller than the velocity at the top of spicular ejection, where visible vertical velocities are determined.*

## ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения солнечной хромосферы на лимбе с высоким пространственным разрешением показывают, что она состоит из множества выступообразных преимущественно вертикальных структур, называемых спикулами. Впервые спикулы были описаны в 1877 г. Секки, который называл их «волосками», «волоконцами», а саму хромосферу образно сравнивал с горячей прерией. Название «спикулы» было введено Робертсом в 1945 г. [54]. Сейчас считается, что спикулы являются основными структурными элементами средней и верхней хромосферы Солнца. Подробно их свойства описаны в классических обзорах Беккерса [23, 24] или монографии Брея и Лоухеда [26]. Многие более поздние работы отражены в нашем обзоре [8], работы последних лет — в работе [57].

Хромосферные спикулы интенсивно исследовались на протяжении нескольких последних десятилетий. Сейчас в основном известны их морфологические и динамические характеристики и физические условия в них. Однако некоторые наблюдательные данные (особенно по динамике) остаются довольно противоречивыми, суть физических процессов, происходящих в спикулах, и природа их возникновения по-прежнему не вполне ясны. Предложено множество моделей образования спикул, но ни одна из них не объясняет всей совокупности наблюдательных данных. Это обусловлено большими трудностями наблюдений столь маломасштабных неоднородных быстроизменяющихся образований, какими являются спикулы. В то же время спикулы могут играть важную роль в балансе вещества в солнечной атмосфере, и в частности, в образовании короны и солнечного ветра. Поэтому изучение спикул остается одной из актуальнейших задач солнечной физики.

Проанализируем наблюдаемые динамические характеристики спикул на лимбе и мелких узелков на диске и покажем, что эти данные можно согласовать в предположении непостоянства скорости движения вещества в продольном сечении спикулы.

## СПИКУЛЫ ЗА ЛИМБОМ

Лучше всего спикулы видны в линии  $H_{\alpha}$ , но они наблюдаются и в других линиях бальмеровской серии водорода, линиях гелия, ионизованного кальция и некоторых других. В центре линии  $H_{\alpha}$  спикулы особенно хорошо видны на высотах более 4000—5000 км. Ниже они накладываются друг на друга и сливаются, создавая иллюзию однородной хромосферы. При наблюдениях с узкополосными фильтрами в крыльях линии  $H_{\alpha}$  они прослеживаются почти до самого лимба.

Типичная спикула появляется над лимбом как яркий излучающий выступ-сгусток в нижней хромосфере, который далее быстро растет вверх и увеличивает свою яркость, достигая максимальной высоты и яркости через 3—5 мин после своего появления. Далее яркость спикулы постепенно уменьшается, она увядает и рассеивается в пространстве или опускается вниз со скоростью, сравнимой со скоростью подъема. Согласно работе [41] видимое опускание наблюдается примерно у 40 % спикул, а согласно работе [61] таких спикул еще меньше; большинство спикул «увядают», иногда довольно резко, после достижения максимальной высоты. Время жизни спикулы от момента появления выступа-сгустка в нижней хромосфере и до ее полного исчезновения из поля зрения составляет в среднем 10—15 мин.

Поперечные размеры спикул близки к пространственному разрешению наблюдений, поэтому их точные значения определить трудно. Считается,

что диаметр спикулы составляет в среднем около  $1''$ ; лучшие фотометрические оценки дают 815 км [30] и 950 км [44]. Согласно работе [48] типичный диаметр спикулы составляет около 500 км. В работах [1, 18] по методу покрытия спикул Луной во время солнечного затмения найдено, что наряду с толстыми спикулами с диаметром 1200 км встречаются и тонкие с диаметром 200—300 км. Диаметр типичной спикулы почти не изменяется с высотой и во времени [44].

Видимые высоты спикул составляют в среднем  $10\text{--}15''$ , максимальная видимая высота —  $17\text{--}19$  тыс. км. Как было показано в работе [41], средняя высота спикул на полюсах составляет около 9500 км, уменьшается с уменьшением гелиографической широты и достигает 7300 км на близэкваториальных широтах. Впоследствии этот результат был подтвержден в работах [21] и [50].

Спикулы за лимбом не всегда являются вертикальными; видимые наклоны спикул к локальной нормали на Солнце составляют преимущественно  $10\text{--}30^\circ$ . Учитывая видимое распределение наклонов спикул за лимбом или темных узелков вблизи края диска (которые обычно отождествляются со спикулами, см. ниже), в работах [36, 45, 46] получено, что реальный наклон к локальной нормали составляет в среднем  $25\text{--}35^\circ$ .

Спикулы имеют тенденцию повторять ориентацию вышележащих корональных лучей: полярные спикулы преимущественно радиальные, с уменьшением гелиографической широты они все больше отклоняются к экватору. Это указывает на то, что ориентация спикул определяется главным образом топологией магнитного поля в солнечной атмосфере, и на возможную генетическую связь хромосферных и корональных образований.

Видимые вертикальные восходящие и нисходящие скорости спикул являются преимущественно постоянными и составляют в среднем  $25\text{--}30$  км/с. Как правило, более быстрые спикулы поднимаются выше, т.е. существует положительная корреляция между видимой восходящей скоростью и высотой спикулы. Эти скорости не обязательно отражают реальные скорости движения вещества, они могут быть просто «кажущимися», отражающими скорость распространения излучения вдоль спикулы.

В отличие от фильтровых наблюдений, спектральные наблюдения позволяют определять реальную скорость движения излучающего вещества вдоль луча зрения. Щель спектрографа «вырезает» некоторый слой спикулы и дает его изображение на спектрограмме. Исследуя последовательность спектрограмм во времени, можно изучить как движение «вырезанного» участка спикулы вдоль луча зрения (лучевые или доплеровские скорости), так и движение вдоль солнечного лимба (тангенциальные движения и скорости). Лучевые скорости спикул составляют в среднем  $5\text{--}10$  км/с, достигая иногда  $50\text{--}70$  км/с. Большинство наблюдательных данных указывают на увеличение лучевой скорости с высотой [9, 16, 17, 37—39], согласно [9, 16, 17, 37, 39] это увеличение происходит линейно. Лучевые скорости изменяются во времени; эти изменения могут носить квазипериодический характер с периодом  $1\text{--}5$  мин и амплитудой несколько км/с [2, 3, 17, 37, 40]. Для многих спикул характерно изменение знака лучевой скорости во времени [2, 7, 10, 11, 51]; иногда наблюдается изменение знака лучевой скорости в зависимости от высоты даже вдоль отдельно выбранной спикулы [17, 37].

Изучение фазо-частотных зависимостей флюктуаций спектральных характеристик спикул одновременно на нескольких высотах приводит к выводу о преобладающем восходящем направлении таких возмущений [55]. В работе [37] обнаружена волна поперечных смещений, распространяющаяся вдоль спикулы снизу вверх.

Изучение изменения лучевых скоростей на нескольких высотах в спикULE показывает, что эти изменения происходят почти одновременно, и скорость вызывающего их агента достигает 300—500 км/с [12—14, 34, 38, 49, 51]. По-видимому, таким возбуждающим агентом являются магнитоги-родинамические волны в окружающей спикУЛУ плазме.

Иногда спикУЛЬНЫЕ спектральные детали имеют наклон к направлению дисперсии, одной из причин которого может быть наличие вращательного движения спикУЛЬНОГО вещества. Наблюдаются примеры как неизменности величины наклона на протяжении промежутка времени до 4 мин, так и постепенного его изменения и смены направления [15]. Моделирование профилей вращающихся спикУЛ указывает на возможный нетвердотельный характер такого движения вещества (наружные слои вращаются быстрее внутренних) [52].

Впервые на наличие движений спикУЛ вдоль лимба было указано в работе [51]. Сейчас установлено, что тангенциальные движения большинства спикУЛ составляют 2—3", смещения носят случайный или направленный характер, иногда они являются квазипериодическими [2, 3, 7, 10, 47]. Средние скорости этих движений близки к средним значениям лучевых скоростей и также составляют 5—10 км/с. В работе [4] обнаружено, что с увеличением высоты над лимбом происходит линейное увеличение тангенциальных скоростей.

Для спикУЛЬНОГО вещества, по-видимому, характерны значительные турбулентные скорости (до 15—25 км/с). Только такой турбулентностью можно объяснить наблюдаемое уширение спикУЛЬНЫХ профилей, которое существенно превышает тепловое уширение.

### СПИКУЛЫ НА ДИСКЕ

Естественно считать, что солнечным спикУЛАМ, наблюдаемым на лимбе, должны соответствовать определенные образования и при наблюдениях в хромосферных линиях на диске. Большинство исследователей полагают, что это мелкие узелки. Мелкие узелки, видимые преимущественно в свете ядра линии  $H_{\alpha}$ , выглядят, как правило, темными на светлом фоне. Однако встречаются в меньшем количестве также и яркие мелкие узелки; при этом они часто располагаются в непосредственной близости от темных узелков. Поперечные размеры (около 1"), количество (около 400—500 тысяч), время жизни мелких узелков (10—15 мин) и физические условия в них ( $T = 7000—13000$  К,  $N_e = 4 \cdot 10^{16}—10^{17}$  м<sup>-3</sup>) близки к соответствующим параметрам спикУЛ [8, 23, 24, 26, 60] (см. таблицу). Мелкие узелки располагаются

Сравнение свойств хромосферных спикУЛ и мелких узелков

Параметр	СпикУЛЫ	Узелки
Поперечный размер, км	750	750
Длина, км	7000—10000	3000—7000
Наклон, град	25—30	25—30
Расположение	Границы супергранул	Границы супергранул
Количество	400 000	400 000
Время жизни, мин	10—12	10—12
Скорость удлинения (видимая), км/с	25—30	≤ 20
Лучевая скорость, км/с	5—10	3—4
Температура, град	12—16	7—13
Электронная плотность, м <sup>-3</sup>	(3—10) · 10 <sup>16</sup>	(4—10) · 10 <sup>16</sup>
Плотность вещества, м <sup>-3</sup>	(3—11) · 10 <sup>16</sup>	(4—11) · 10 <sup>16</sup>
Доплеровская полуширина, нм	0.05	0.05
Оптическая плотность $\tau_0$	1—3	1

преимущественно на границах супергрануляционных ячеек и в местах стыка нескольких супергранул, где они образуют «цепочки» и «кусты» или «розетки», состоящие из нескольких узелков. Некоторые наблюдения взаимосвязанных темных и ярких узелков указывают на то, что эти детали — элементы верхней и нижней хромосферы соответственно и, возможно, являются верхней и нижней частью одной и той же структуры, видимой на лимбе как спикула [22, 25]. Иногда можно уверенно проследить яркие или темные узелки на лимбе, продолжающиеся вверх в форме спикул, или спикулы, пересекающие лимб и имеющие в своем основании темные или яркие узелки [5, 19, 22, 43].

Близость многих морфологических и физических свойств узелков и спикул и трудность их наблюдения иногда приводят к неоднозначным выводам о структуре и природе хромосферы и к тому, что в разное время со спикулами отождествлялись то яркие, то темные узелки. Беккерс [23] исследовал модельную зависимость физических условий в спикуле по высоте и пришел к выводу, что спикула в проекции на диск может выглядеть либо яркой, либо темной в зависимости от ее положения относительно лимба, длины волны и высоты над фотосферой. Более поздние модельные расчеты и сравнение с наблюдаемыми профилями узелков также привели к заключению об единой природе узелков и спикул [35, 58, 59]. Получено также, что яркостное различие узелков (темные — светлые) вызвано различием газового давления, причем не более чем двухкратным [35].

Поскольку темные узелки лучше всего видны в крыльях линии  $H_{\alpha}$ , то можно ожидать, что в них происходят восходящие и нисходящие движения вещества со скоростями 20—50 км/с, сравнимые с видимыми вертикальными скоростями спикул за лимбом. Близость лучевых скоростей узелков и видимых вертикальных скоростей спикул была бы еще одним свидетельством их тождественности. Тем не менее, полученные распределения лучевых скоростей узелков по наблюдениям вблизи центра диска показали, что эти скорости не превышают 20 км/с, и в среднем составляют около 4 км/с как для ярких, так и для темных узелков [31—33]. Это в 2—4 раза меньше средних лучевых скоростей спикул на лимбе и почти на порядок ниже их видимых вертикальных скоростей. Указанное различие скоростей узелков и спикул анализировалось неоднократно (см., например, [32, 33, 58]). Высказывались различные предположения: от нетождественности узелков и спикул до непригодности сильных хромосферных линий для корректного определения лучевой скорости при наблюдениях на диске; однако пока эта проблема окончательно не решена.

#### ДИНАМИКА СПИКУЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА

Важнейшим вопросом динамики спикул является вопрос, насколько реально видимые вертикальные скорости спикул отражают действительное движение вещества. Если считать, что видимая восходящая скорость спикул отражает движение вещества в проекции на картинную плоскость, а лучевая скорость — движение вещества вдоль наклоненной к картинной плоскости спикулы, то наблюдаемые средние значения видимой вертикальной скорости, лучевой скорости и наклона спикулы к нормали довольно неплохо согласуются между собой [7, 26].

Когда были детально исследованы тангенциальные движения спикул вдоль лимба, обнаружилось, что как абсолютные их значения, так и характер изменения очень близки доплеровским движениям. Это указывает на то, что лучевые скорости спикул в значительной мере являются

следствием движения самих спикул или их участков вдоль солнечной поверхности. Высказывались также соображения, что спикула представляет собой некий газо-плазменный стержень, «закрепленный» на высоте 500—1500 км и колеблющийся вдоль солнечной поверхности с периодом 3—5 мин [9, 39] или же совершающий прецессионные круговые движения вдоль направляющей конуса [3]. Получалось, что лучевые скорости являются всего лишь отражением колебательных движений спикул вдоль солнечной поверхности.

В то же время в работе [7] мы провели тщательные комплексные исследования динамики спикул на высоте около 4200 км над лимбом и пришли к выводу, что все имеющиеся данные по динамике спектральных характеристик спикул за лимбом можно объяснить предположением, что лучевые скорости отражают как восходящее и нисходящее движение вещества вдоль спикульной оси, так и движение самой спикулы вдоль солнечной поверхности. Несколько ранее такой же вывод получен Гуляевым [5]. Если бы спикула совершала только колебательные или прецессионные движения, то изменения доплеровских смещений всегда сопровождались бы изменением знака смещения, что противоречит наблюдениям. В то же время часто встречаются спикулы, лучевая скорость которых существенно отлична от нуля и примерно постоянна во времени, а тангенциальная скорость изменяется, или же наоборот [7, 10].

Таким образом, можно утверждать, что лимбовые спектральные наблюдения подтверждают вывод о наличии движения вещества вдоль спикульной оси. Более того, изучение эволюции спикул по спектральным наблюдениям на лимбе подтверждает, что спикульное вещество выбрасывается снизу, и в начальные моменты жизни спикулы скорость вещества, как правило, довольно существенна.

Так, согласно работам [12, 13] возникновению спикулы предшествует появление диффузных деталей со слабо выраженной структурой из узких струек, часто обладающих значительными лучевыми скоростями, а само образование спикулы, как правило, связано с появлением протяженного крыла-выброса в спектре хромосферы. Всегда появление и развитие спикулы на нижних высотах предшествует ее появлению на верхних высотах. Согласно наблюдениям на девяти высотных уровнях хромосферы [17, 37] спикулы возникают на малых высотах. Затем примерно в течение 3 мин в линии  $H_{\alpha}$  и 5 мин в линии  $D_3$  излучение достигает максимальной высоты и интенсивности, распространяясь вверх со скоростью 15 и 13 км/с соответственно. В состоянии максимального излучения спикула находится более половины своего времени жизни, а затем интенсивность ослабевает и спикула исчезает.

Недавние исследования динамики темных мелких узелков также указывают на наличие больших скоростей вещества вдоль оси узелка, сравнимых с видимыми на лимбе вертикальными скоростями спикул.

В работах [58, 59] проведено подробное изучение динамики нескольких типичных мелких узелков по наблюдениям на многоканальном спектрографе двойного прохождения MSDP на обсерватории Пик дю Миди. Получен вывод, что в нижней части узелка преобладают нисходящие объемные движения, а в верхней — восходящие. В процессе эволюции восходящее движение в верхней части узелка, длящееся примерно 2—6 мин, переходит в нисходящее, длящееся 1—2 мин. Восходящие движения часто связаны с увеличением поглощения, что может ожидать в случае, если появление темного узелка связано с инъекцией плазмы в рассматриваемый объем. Причем получено, что восходящие и нисходящие скорости иногда превышают 20 км/с.

Исследование темных мелких узелков в области усиленной хромосферной сетки [56] показало, что для большинства узелков (76 из 96) в начале их времени существования наблюдаются восходящие движения вещества со скоростями до 40 км/с, которые затем переходят в нисходящие. Получено также, что, по-видимому, вещество интенсивно ускоряется в начале явления и далее постепенно замедляется. Движение некоторых узелков можно представить наклонными баллистическими траекториями с эффективным замедлением, которое в 2—6 раз меньше ускорения свободного падения вблизи поверхности Солнца.

Выше мы уже отмечали, что главным противоречием в отождествлении спикул за лимбом и узелков на диске является различие наблюдаемых скоростей. Гуляев [6] предлагает отказаться от представлений о высокоскоростном потоке вещества вдоль спикул и считает, что спикулы не могут рассматриваться как источник поступления вещества в корону. Проведенный нами анализ наблюдательных данных по динамике спикул и узелков приводит к заключению о том, что спикулы и узелки — это два проявления одного и того же явления, и что вдоль спикульной оси действительно происходит движение вещества с большими скоростями. По-видимому, нельзя полагать, что из наблюдаемого постоянства видимой вертикальной скорости спикул за лимбом следует вывод о постоянном истечении вещества вдоль спикул с такими скоростями.

Спикула, по-видимому, представляет собой некий возвратный выброс: вещество движется первоначально вверх, затем — вниз. Причем нисходящая фаза может быть невидимой, например, в линии  $H_{\alpha}$  вследствие прогрева плазмы и полной ионизации водорода. Известное противоречие между лучевыми скоростями узелков и видимыми скоростями спикул можно легко устранить, если учесть, что видимая вертикальная скорость спикулы определяется по верхушке спикулы, где вещество может двигаться со скоростью, отличной от скорости в средней части спикулы, где, как правило, и определяются лучевые скорости узелков и спикул. Данное предположение подтверждается как результатами исследований [56, 58, 59], так и наблюдаемым увеличением лучевой скорости спикул с высотой [9, 16, 17, 37—39]. Необходимо также отметить, что современной точности наблюдений недостаточно, чтобы с уверенностью утверждать, движется ли верхушка спикулы с постоянной скоростью, или же при достижении максимальной высоты ее движение является баллистическим [20, 48]. Лучевая скорость узелков на диске представляет собой некую «интегральную» скорость вещества вдоль спикулы, в которой суммируются и восходящее движение в верхней части спикулы, и нисходящее движение вблизи основания, и менее динамичная центральная часть. Помимо распространения потока вещества, вдоль спикулы, по-видимому, распространяются волны различных типов, воздействующие на спикульную плазму и вызывающие постоянное изменение ее параметров и, вероятно, способствующие поддержанию самой спикулы. Эти волны вместе с процессами перестройки магнитных полей на границах супергранул, вероятно, и «отвечают» за наблюдаемые тангенциальные движения спикульного вещества.

Возможно, некоторая часть вещества из верхушки спикулы выбрасывается вверх и далее уходит в корону и в солнечный ветер. Это предположение подтверждается сообщением [27] о наблюдении «испарения» спикул. Возможно также, что более высокие и более быстрые спикулы дают больший вклад в поток вещества в корону. В работе [42] сообщалось о некоторой критической высоте (около  $20''$  над фотосферным лимбом), над которой происходят выбросы вещества макроспикулами в корону в районе полярной корональной дыры.

Основная часть вещества, первоначально выброшенного спикулами вверх, затем возвращается вниз как в виде нисходящих движений в спикулах-узелках, так и в виде наблюдаемого в УФ-линиях постоянного нисходящего потока на границах супергрануляционных ячеек [29, 53].

Как отмечалось во введении, многие наблюдательные данные по динамике спикул весьма противоречивы. Недостаточное пространственное разрешение, быстрая переменность спикул, зависимость их характеристик от локальных или глобальных проявлений солнечной активности приводят к неоднозначным или противоречивым выводам. Многие наблюдательные факты свидетельствуют о том, что спикулы более структурированы, чем это кажется на первый взгляд. Так, на некоторую «дублетность» или многокомпонентность спикул указывали Никольский и Сазанов [11]. Позже на возможную структурированность обращалось внимание в работах [2, 7, 11, 49, 55]. В недавней работе [28] по результатам наблюдений спикул на лимбе и узелков на диске с пространственным разрешением около  $0.3''$  получено, что спикулы-узелки состоят из нескольких тонких нитей с диаметром менее 200 км.

Вероятно, существенный прогресс в изучении спикул и хромосферы в целом станет возможным после выведения на орбиту большого солнечного оптического телескопа с пространственным разрешением лучше  $0.1''$ . В то же время наземные наблюдения далеко еще не исчерпали себя. Например, важные результаты могут быть получены при одновременных или скоординированных высокоточных фильтровых и спектральных наблюдениях на лимбе. В прояснении нуждается также вопрос зависимости свойств спикул от уровня солнечной активности, для чего вполне пригодны длительные качественные однотипные наблюдения с земной поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на многие противоречия наблюдаемых динамических характеристик спикул на лимбе и мелких узелков на диске, они могут рассматриваться как разные проявления одного и того же явления в солнечной атмосфере. По-видимому, спикулы-узелки являются некими возвратными выбросами вещества вверх из фотосферы и нижней хромосферы. Основная часть выбрасываемого спикулами вещества затем возвращается вниз как в виде нисходящего движения самих спикул, так и в виде постоянного нисходящего потока, наблюдаемого в УФ-линиях на границах супергранул. Небольшая часть вещества спикул «подпитывает» корону и солнечный ветер. Известное противоречие между видимыми на лимбе вертикальными скоростями спикул и лучевыми скоростями узелков на диске можно объяснить тем, что первые неадекватно отражают движение вещества в продольном сечении спикулы. По-видимому, скорость движения вещества вдоль оси в средней части спикулы ниже, чем в ее верхней части, по которой определяются видимые вертикальные скорости. Поток различных волн снизу вызывает изменение параметров спикульной плазмы и поддерживает спикульное вещество, противодействуя сильному гравитационному притяжению Солнца. Для выяснения подробной картины движения вещества и структуры спикулы нужны наблюдения с пространственным разрешением не хуже  $0.1''$ .

1. Айманова Г. К., Айманов А. К., Гуляев Р. А. Определение поперечных размеров хромосферных спикул по наблюдениям покрытий спикул Луною во время частного затмения Солнца // Солн. данные.—1981.—№ 1.—С. 85—87.
2. Гаджиев Т. Г. Спектральные исследования хромосферных  $H_{\alpha}$ -спикул // Солн. данные.—1981.—№ 10.—С. 96—101.



3. Гаджиев Т. Г., Никольский Г. М. Движение хромосферных спикул // Письма в Астрон. журн.—1982.—8, № 10.—С. 633—635.
4. Гаджиев Т. Г., Газиев Г. А. Исследование движения спикул вдоль лимба // Солн. данные.—1982.—№ 10.—С. 99—103.
5. Гуляев Р. А. Структура невозмущенной хромосферы, наблюдаемой за лимбом Солнца (обзор) // Астрометрия и астрофизика.—1983.—Вып. 48.—С. 25—31.
6. Гуляев Р. А. Являются ли спикулы источником коронального вещества? // Астрон. журн.—1991.—68, № 6.—С. 1108—1110.
7. Иванчук В. И., Пишкало Н. И. Спектральные исследования динамики  $H_{\alpha}$  спикул // Пробл. космич. физики.—1985.—Вып. 20.—С. 16—24.
8. Иванчук В. И., Пишкало Н. И. Солнечные хромосферные спикулы. — Киев: Киев. ун-т, 1992.—126 с.—(Деп. в УкрИНТЭИ 29.04.92, № 543-Ук92).
9. Кулиджанишвили В. И., Хуцишвили Э. В. Спектральные наблюдения  $H_{\alpha}$  спикул на разных высотах солнечной хромосферы // Солн. данные.—1981.—№ 2.—С. 81—86.
10. Мамедов С. Г., Оруджев Э. Ш. Возникновение и движение спикул // Солн. данные.—1975.—№ 5.—С. 92—101.
11. Никольский Г. М., Сазанов А. А. Движение и природа  $H_{\alpha}$ -спикул в солнечной хромосфере // Астрон. журн.—1966.—43, № 5.—С. 928—935.
12. Папушев П. Г. Возникновение и эволюция  $H_{\alpha}$ -спикул. — Иркутск, 1981.—37 с.—(Препринт / СибИЗМИР; № 16-81).
13. Папушев П. Г. Эволюция хромосферных спикул // Бюлл. Абастум. астрофиз. обсерв.—1985.—№ 60.—С. 75—84.
14. Папушев П. Г., Салахутдинов Р. Т. Флуктуации параметров профиля  $H_{\alpha}$  спикул // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физ. Солнца.—1990.—Вып. 91.—С. 194—200.
15. Пишкало Н. И. Изучение наклонов спектров спикул // Солн. данные.—1986.—№ 7.—С. 82—85.
16. Хуцишвили Э. В. Характеристики  $D_3$ -спикул на различных высотах // Солн. данные.—1981.—№ 5.—С. 116—119.
17. Хуцишвили Э. В. Динамика и эволюция  $H_{\alpha}$  и  $D_3$  спикул // Бюлл. Абастум. астрофиз. обсерв.—1985.—№ 60.—С. 65—74.
18. Ajmanova G. K., Ajmanov A. K., Gulyaev R. A. Study of the brightness distribution across spicules from observations of the spicule occultation by the Moon at the partial solar eclipse // Solar Phys.—1982.—79, N 2.—P. 323—326.
19. Alissandrakis C. E., Macris C. J. A study of the fine structure of the solar chromosphere at the limb // Solar Phys.—1971.—20, N 1.—P. 47—56.
20. Athay R. J., Thomas R. N. The number and motions of solar spicules // Astrophys. J.—1957.—125, N 3.—P. 804—810.
21. Athay R. G. The number of spicules in middle chromosphere // Astrophys. J.—1959.—129, N 1.—P. 164—172.
22. Banos G. J., Macris C. J. New observational results for the solar chromosphere // Solar Phys.—1970.—12, N 1.—P. 106—114.
23. Beckers J. M. Solar spicules // Solar Phys.—1968.—3, N 3.—P. 367—433.
24. Beckers J. M. Solar spicules // Ann. Rev. Astron. and Astrophys.—1972.—10.—P. 73—100.
25. Bray R. J. High-resolution photography of the solar chromosphere. VI. Properties of the bright mottles // Solar Phys.—1969.—10, N 1.—P. 63—70.
26. Bray R. J., Loughhead R. E. The solar chromosphere. — London: Chapman & Hall, 1974.—384 p.
27. Budnik F., Schroder K.-P., Glassmeier K.-H., Wilhelm K. First observational evidence for “evaporating” spicules // Solar Jets and Coronal Plumes / Ed. by Tan-Duc Guyenne. — Noordwijk: ESA, 1998.—P. 249—254.—(ESA SP-421).
28. Dara H., Koutchmy S., Suematsu Y. Properties of  $H_{\alpha}$  spicules from disk and limb high-resolution observations // Solar Jets and Coronal Plumes / Ed. by Tan-Duc Guyenne. — Noordwijk: ESA, 1998.—P. 255—262.—(ESA SP-421).
29. Doschek G. A., Feldman U., Bohlin J. D. Doppler wavelength shifts of transition zone lines measured in Skylab solar spectra // Astrophys. J. Lett.—1976.—205.—P. L177—180.
30. Dunn R. B. Photometry of the solar chromosphere — Thesis.—Harvard University.—1960. = Sac. Peak. Obs. Contribs N 87.—1965.
31. Grossmann-Doerth U., von Uexkull M. Spectral investigations of chromospheric fine structure // Solar Phys.—1971.—20, N 1.—P. 31—46.
32. Grossmann-Doerth U., von Uexkull M. Spectral investigations of the chromosphere. II. The nature of the mottles and a model of the overall structure // Solar Phys.—1973.—28, N 2.—P. 319—332.
33. Grossmann-Doerth U., Schmidt W. Chromospheric fine structure revisited // Astron. and Astrophys.—1992.—264, N 1.—P. 236—242.

34. Hasan S. S., Keil S. L. Time-resolved spectral observations of spicule velocities at several heights // *Astrophys. J.*—1984.—283, N 2.—P. 75—77.
35. Heinzel P., Schmieder B. Chromospheric fine structure: black & white mottles // *Astron. and Astrophys.*—1994.—282, N 3.—P. 939—954.
36. Heristchi D., Mouradian Z. On the inclination and the axial velocity of spicules // *Solar Phys.*—1992.—142, N 1.—P. 21—34.
37. Khutsishvili E. V. Continuous spectral observations of spicules // *Solar Phys.*—1986.—106, N 1.—P. 75—86.
38. Krall K. R., Bessey R. J., Beckers J. M. A time evolution study of solar spicules // *Solar Phys.*—1976.—46, N 1.—P. 93—114.
39. Kulidzanishvili V. I. Dynamics of  $H_{\alpha}$  spicules according to spectral observations at various heights of the solar chromosphere // *Solar Phys.*—1980.—66, N 2.—P. 251—258.
40. Kulidzanishvili V. I., Nikolsky G. M. Properties of the solar chromosphere  $H_{\alpha}$  spicules as observed spectrally // *Solar Phys.*—1978.—59, N 1.—P. 21—28.
41. Lippincott S. L. Chromospheric spicules // *Smithsonian Contr. to Astrophys.*—1957.—2, N 2.—P. 15—23.
42. Loucif M. Giant macrospicules as possible sources of the fast solar wind // *Astron. and Astrophys.*—1994.—281, N 1.—P. 95—107.
43. Loughhead R. E., Tappere E. J. High-resolution photography of the solar chromosphere. IX. Limb observations of high spectral purity // *Solar Phys.*—1971.—19, N 1.—P. 44—51.
44. Lynch D. K., Beckers J. M., Dunn R. B. A morphological study of solar spicules // *Solar Phys.*—1973.—30, N 1.—P. 63—70.
45. Mosher J. M., Pope T. P. A statistical study of spicule inclinations // *Solar Phys.*—1977.—53, N 2.—P. 375—384.
46. Mouradian Z. L'inclinaison des spicules chromospheriques par rapport a la normale a la surface solaire // *Compt. Rend. Acad. Sci.*—1974.—B279, N 26.—P. 683—685.
47. Nikolsky G. M., Platova A. G. Motions of  $H_{\alpha}$ -spicules along the solar limb // *Solar Phys.*—1971.—18, N 3.—P. 403—409.
48. Nishikawa T. Spicule observations with high spatial resolution // *Publ. Astron. Soc. Japan.*—1988.—40, N 5.—P. 613—625.
49. Pampushev P. G., Salakhutdinov R. T. The dynamics of chromospheric spicules // *Space Science Reviews.*—1994.—70.—P. 47—51.
50. Parmenter B. C. Observations of solar chromospheric spicules // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1966.—78, N 462.—P. 250—253.
51. Pasachoff J. M., Noyes R. W., Beckers J. M. Spectral observation of spicules at two heights in the solar chromosphere // *Solar Phys.*—1968.—5, N 2.—P. 131—158.
52. Pishkalo M. I. Non-rigid rotation of solar spicules // *Astron. Nachr.*—1994.—315, N 5.—P. 391—397.
53. Poletto G. Mass motion in the transition region // *Solar Phys.*—1981.—73, N 2.—P. 233—256.
54. Roberts W. O. A preliminary report on chromospheric spicules of extremely short lifetimes // *Astrophys. J.*—1945.—101, N 2—3.—P. 136—140.
55. Salakhutdinov R. T., Pampushev P. G. An investigation of the dynamical properties of  $H_{\alpha}$  and  $D_3$  spicules // *Solar Jets and Coronal Plumes* / Ed. by Tan-Duc Guyenne. — Noordwijk: ESA, 1998.—P. 29—33.—(ESA SP-421).
56. Suematsu Y., Wang H., Zirin H. High-resolution observation of disk spicules. I. Evolution and kinematics of spicules in the enhanced network // *Astrophys. J.*—1995.—450, N 1.—P. 411—421.
57. Suematsu Y. Solar spicules: a brief review of recent high resolution observations // *Solar Jets and Coronal Plumes* / Ed. by Tan-Duc Guyenne. — Noordwijk: ESA, 1998.—P. 19—28.—(ESA SP-421).
58. Tsiropoula G., Alissandrakis C. E., Schmieder B. The fine structure of a chromospheric rosette // *Astron. and Astrophys.*—1993.—271, N 2.—P. 574—586.
59. Tsiropoula G., Alissandrakis C. E., Schmieder B. Time evolution of fine structures in the solar chromosphere // *Astron. and Astrophys.*—1994.—290, N 1.—P. 285—294.
60. Tsiropoula G., Schmieder B. Determination of physical parameters in dark mottles // *Astron. and Astrophys.*—1997.—324, N 3.—P. 1183—1189.
61. Zirin H., Cameron R. Dynamics of solar spicules // *Solar Jets and Coronal Plumes* / Ed. by Tan-Duc Guyenne. — Noordwijk: ESA, 1998.—P. 39—41.—(ESA SP-421).

Поступила в редакцию 27.08.00