

# Выбросы солнечной плазмы, обогащенной $^3\text{He}$ и FeI, на границах корональных дыр

Л. М. Козлова<sup>a</sup>, Б. В. Сомов

*Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга МГУ, отдел физики Солнца.  
Россия, 119991, Москва, Университетский просп., д. 13. E-mail: <sup>a</sup>kozlova-lm@yandex.ru*

Статья поступила 22.09.2008, подписана в печать 18.12.2008.

С целью изучения повышенной активности Солнца на границах корональных дыр исследованы спектры и спектрограммы в ИК-линии HeI  $\lambda = 1083.03$  нм, полученные на горизонтальном солнечном телескопе ГАИШ МГУ. Наши наблюдения демонстрируют усиление потоков плазмы на границе между корональной дырой и биполярной активной областью. При этом спектры в окрестности линии HeI  $\lambda = 1083.03$  нм показывают существенное усиление в линиях легкого изотопа  $^3\text{He}$   $\lambda = 1083.168$  нм и FeI  $\lambda = 1082.837$  нм. Ускорение потоков солнечной плазмы на границе корональной дыры в непосредственной близости с активной областью возникает, по-видимому, в результате пересоединения магнитных полей биполярных структур активной области и униполярного поля корональной дыры. Обсуждается природа обогащения  $^3\text{He}$  и FeI частиц в восходящих потоках на границе корональных дыр.

**Ключевые слова:** Солнце, корональные дыры, активные области, магнитные поля, магнитное пересоединение.  
УДК: 523.94; 523.98; 523.745. PACS: 96.60.qd.

## Введение

Корональные дыры (КД) представляют собой обширные области в атмосфере Солнца с относительно холдной плазмой низкой плотности. Они характеризуются в основном униполярным магнитным полем, открытым в межпланетное пространство, без существенной активности внутри КД [1, 2]. По наблюдениям в мягком рентгене и высокотемпературных EUV-линиях КД видны как обширные темные области с ослабленной эмиссией. В хромосферной линии HeI 1083.0 нм КД обнаруживаются как светлые образования с ослабленной интенсивностью сетки и контрастом [3–5]. Современные спутниковые наблюдения показывают, что внутри корональных дыр вблизи их границ часто возникают импульсные компактные активные области (яркие точки), способные порождать видимые в мягком рентгеновском излучении (SXR) мощные корональные джеты [6]. Высокоэнергичные джеты наблюдались во внешней короне на расстоянии  $1.7R_{\odot}$  в экспериментах на SOHO и Ulysses [7]. Эти джеты возникли на границе КД и активной области (АО). Случай наблюдения корональных джетов с обогащением изотопом  $^3\text{He}$  и усилением линии FeI описаны в работе [8].

Цель настоящей статьи - исследование границ КД и соседних с ними областей на уровне основания короны — хромосферы, используя спектры и распределения яркости на диске Солнца в линиях HeI 1083.0 нм и H $\alpha$ . Эти линии образуются на разных уровнях в хромосфере и их анализ дает информацию о ее строении и динамике [9]. Наши наблюдения показывают, что усиление потоков солнечной плазмы на границе КД и АО сопровождается обогащением изотопом  $^3\text{He}$  и усилением линии FeI.

## Наблюдения корональных дыр

Линия HeI 1083.0 нм представляет собой особый интерес для обнаружения и изучения свойств таких слабоконтрастных образований, как КД, которые являются источником солнечного ветра и поэтому играют важную

роль в солнечно-земных связях. Предлагаемая статья — прямое продолжение наших предыдущих работ [4, 5, 10]. В работе [5] показано, что в областях КД в центре линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм наблюдается увеличение интенсивности излучения, сопровождаемое уменьшением размеров и контраста хромосферной сетки по сравнению с их значениями в спокойных фоновых полях. Почти одновременные наблюдения в линиях HeI  $\lambda = 1083.0$  нм и H $\alpha$  [4] обнаруживают «темные точки» в виде цепочек, окружающих корональные дыры. Лучевые скорости подъема плазмы в темных точках в 3–5 раз превосходят скорости внутри КД и в спокойных областях (см. рис. 2 и таблицу в работе [4]). Сравнение наших спектральных наблюдений КД и граничащих с ними АО в линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм с изображениями короны над этими областями в SXR со спутника Yohkoh, а также с векторными магнитограммами АО и картами КД дает новую информацию о корональном нагреве над АО в отсутствие вспышек [10].

Настоящая работа демонстрирует, что большинство наблюдавшихся нами в линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм случаев усиления потоков плазмы на границах КД и АО сопровождается обогащением легким изотопом  $^3\text{He}$  с одновременным усилением линии FeI  $\lambda = 1082.837$  нм.

Фотоэлектрические наблюдения проводились на горизонтальном солнечном телескопе Кучинской обсерватории ГАИШ с 1992 г. Основные параметры установки, техника и методика наблюдений описаны в работах [5, 9]. На рис. 1, а представлено распределение интенсивности в центре линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм, полученное 27.08.1996 для полосы на диске Солнца, проходящей через активную область 7986 NOAA. Положение полосы относительно оси вращения и центра диска Солнца показано на рис. 1, б, который представляет собой соответствующую рис. 1, а карту изолиний с шагом изменения интенсивности, равным 0.033. Наблюданная полоса проходит вдоль суточной параллели Солнца, щель спектрографа расположена вдоль вертикала Солнца ( $Z$ ). По осям  $x$  и  $y$  указаны расстояния в долях радиуса Солнца. На рис. 1 хорошо видны потемнения диска

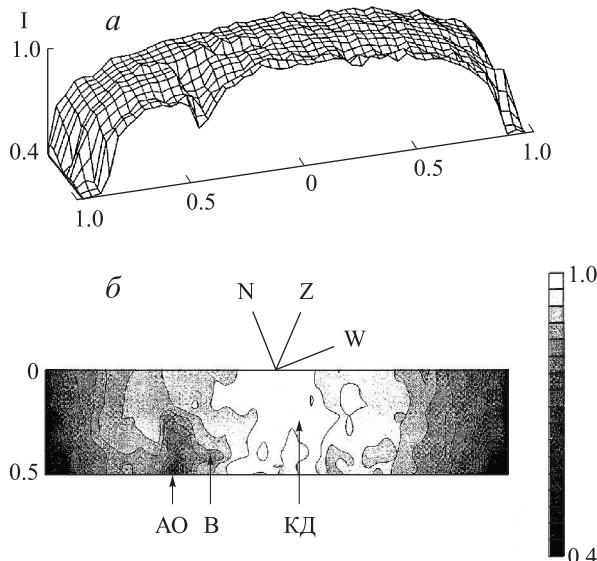


Рис. 1. Результаты сканирования поверхности Солнца в центре линии  $\text{HeI } \lambda = 1083.0$  нм 27.08.1996: *а* – двумерное распределение интенсивности  $I$ , *б* – карта изолиний интенсивности

к краю, существенное ослабление интенсивности в АО, а также всплески излучения за лимбом. Наиболее яркую область в центральной части диска, которая сильно нарушает кольцевую структуру изофот, присущую спокойному Солнцу, мы отождествляем с КД, так как эта область ярче окружающего фона на 3.3%, что характерно как раз для КД [5]. Проверка по снимкам в других линиях, найденным в Интернете, подтвердила наличие КД. На  $\text{H}\alpha$ -фильтограмме видно также большое темное волокно, которое пересекает АО 7986 вдоль линии раздела полярности. На наших изофотах (рис. 1, б) эта АО, волокно В и КД показаны внизу стрелками. Рис. 1, б и спектры, записанные в области, указанной стрелкой В, отчетливо демонстрируют тот факт, что волокно В возникает из области наибольшего сближения АО с корональной дырой.

Мы полагаем, что присутствие биполярной АО в непосредственной близости от КД играет основную роль в механизме возникновения волокна — спокойного протуберанца. А именно в результате магнитного пересоединения, происходящего в фотосфере в области температурного минимума между биполярной АО и почти униполярным вертикальным полем КД, возникает восходящий поток плазмы из фотосферы в корону. Этого потока (до  $\sim 10^{12}$  г/с) достаточно для формирования крупных протуберанцев [11]. Наши наблюдения в центре линии  $\text{HeI } \lambda = 1083.0$  нм и в линии  $\text{H}\alpha$  и  $\text{H}\alpha \pm 0.05$  нм [4] показывают усиления потоков на границах КД и АО до 20 км/с и более.

### Усиление линий $^3\text{He}$ и $^4\text{He}$

Задача измерения содержания изотопов  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  в атмосфере Солнца сложна, но разрешима. Технике и методике измерения отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  на солнечных телескопах ГАИШ посвящены наши работы [12, 13]. Рис. 2, а демонстрирует спектры в линии  $\text{HeI } \lambda = 1083.0$  нм, полученные в области поднимающегося волокна на границе той же АО 7986, что показана на рис. 1 — спектр 1, рядом внутри КД — спектр 2 и в спокойной атмосфере на том же гелиоцентрическом

расстоянии — спектр 3. Компоненты линии  $^4\text{He}$  в АО (спектр 1) усилены в несколько раз по сравнению со спокойной атмосферой и тем более с КД. На спектре 1 видно, что в голубом крыле теллурической линии  $\lambda = 1083.212$  нм на расстоянии  $\sim 0.045$  нм от центра этой линии имеется небольшая депрессия, которой нет в красном крыле. Мы считаем, что эта депрессия вызвана изотопом  $^3\text{He}$ , усиливающимся в сильных магнитных и электрических полях в процессе магнитного пересоединения. Действительно, учет зеемановского расщепления сильного компонента линии  $^4\text{HeI}$  в  $\lambda = 1083.030$  нм дает приближенную оценку для напряженности магнитного поля  $B \approx (1000 \pm 50)$  Гс в поднимающемся потоке на границе АО и КД на спектре 1.

Изотоп  $^3\text{He}$  определялся нами по небольшой депрессии порядка 2–5%, которая наблюдается в голубом крыле линии паров воды земной атмосферы  $\lambda = 1083.212$  нм на расстоянии 0.045 нм от центра этой линии. На рис. 2, б в увеличенном виде показан приведенный к локальному непрерывному спектру профиль линии изотопа  $^3\text{He}$  согласно спектру 1. Рис. 2, в представляет спектр изотопа  $^3\text{He}$ , полученный по лабораторным данным [14]; здесь компоненты изотопа  $^3\text{He}$  показаны вертикальными черточками в соответствии с их относительными интенсивностями. Согласно лабораторным исследованиям [14] спектр изотопа  $^3\text{He}$  имеет девять компонент сверхтонкой структуры и семью максимальными компонентами занимает участок спектра около 0.05 нм с  $\lambda_{\text{eff}} = 1083.168$  нм, т. е. действительно располагается там, где как раз наблюдается депрессия на нашем спектре 1, полученном в области поднимающегося волокна на границе активной области и корональной дыры. Две из девяти компонент сверхтонкой структуры изотопа  $^3\text{He}$  очень слабы, к тому же они перекрываются с сильным компонентом  $^4\text{He}$  и на записях не видны.

К тому же линии обоих изотопов гелия, как  $^4\text{He}$ , так и  $^3\text{He}$ , бландированы слабыми теллурическими линиями паров воды, которые необходимо учитывать при точных измерениях содержания изотопов. Методика учета этих бленд описана нами в работе [13].

В работе [13] мы получили оценку отношения содержания  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , равную  $N_3/N_4 = 0.041 \pm 0.005$  для факельных полей около пятен. При этом был проведен точный учет бландирования линий изотопов гелия линиями паров воды земной атмосферы и другими слабыми линиями солнечного спектра. Анализ спектра 1 на рис. 2, а, проведенный по методике, описанной в работе [13], дает увеличение содержания изотопа  $^3\text{He}$  в поднимающемся потоке плазмы на границе КД и АО до значений  $N_3/N_4 = 0.109 \pm 0.004$ , демонстрируя усиление  $^3\text{He}$  почти в 3 раза по сравнению с его значением в факельном поле около пятна и более чем в 10 раз по сравнению с областями внутри КД.

На спектре 1 рис. 2, а в красном крыле фотосферной линии  $\text{SiI } \lambda = 1082.714$  нм также обнаружено усиление магниточувствительной линии  $\text{FeI}$  с  $\lambda_{\text{eff}} = 1082.837$  нм, которая отсутствует на спектрах внутри КД и в спокойных областях диска Солнца (спектры 2 и 3). В этой линии  $\text{FeI}$  на спектре 1 также обнаруживается заметное зеемановское расщепление на  $\pi$ - и  $\sigma$ -компоненты, что свидетельствует об усилении магнитного поля в восходящих потоках на границах КД.

Из спектральных наблюдений в областях солнечных вспышек ранее нами обнаружено (см. таблицу в рабо-

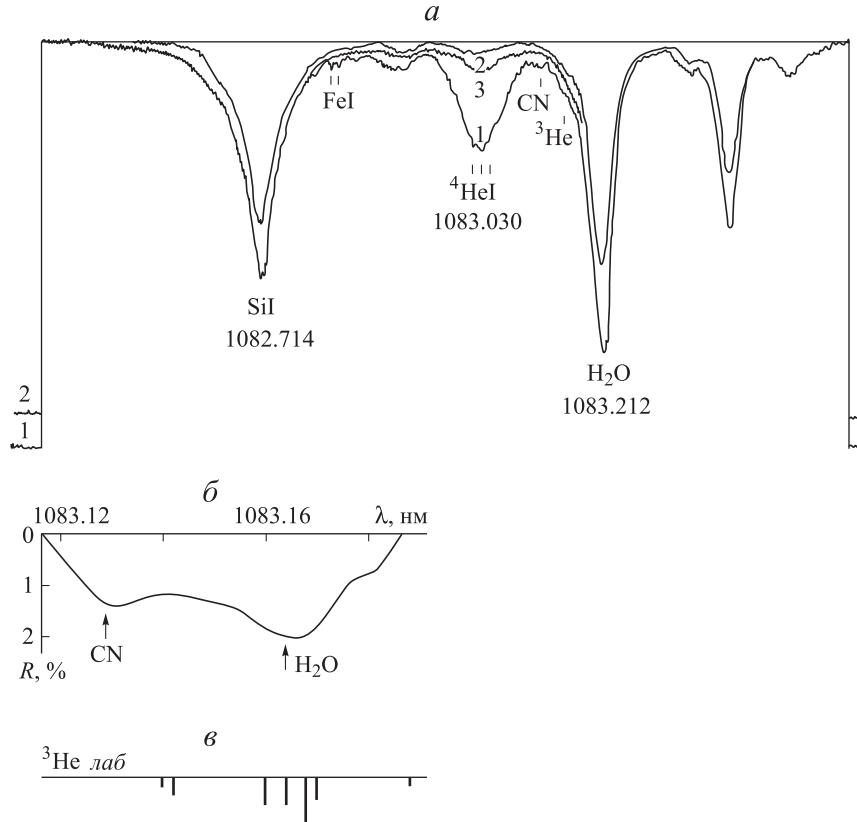


Рис. 2. а Спектры в линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм: спектр 1 — в области волокна на границе корональной дыры и активной области, спектр 2 — внутри корональной дыры, 3 — в спокойной атмосфере. (б) Увеличенный профиль линии изотопа  $^3\text{He}$ , наблюдаемый в АО. (в) спектр  $^3\text{He}$  по лабораторным данным

те [12]) заметное увеличение (от двух до пяти раз) отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  по сравнению с его значением в спокойной атмосфере и факельных полях [13]. При этом не наблюдается прямой зависимости между величиной усиления в  $^3\text{He}$  и мощностью или площадью вспышки в линии  $\text{H}\alpha$ . Напротив, чаще импульсные компактные вспышки дают большее усиление в  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , чем длительные вспышки со сложной пространственной структурой.

В качестве еще одного примера усиления потоков плазмы на границе КД и АО на рис. 3 представлены результаты сканирования в центре линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм большого протуберанца на EN-лимбе 20.08.1997. Этот протуберанец возник за лимбом на границе АО 8076 и большой протянувшейся через весь диск КД, показанной на рис. З изолиниями в FeXIV (данные «Solar Geophysical Data»). Рис. 4 демонстрирует спектры, полученные нами в линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм: спектр 1 — в области восходящего потока на границе КД и АО, спектр 2 — в факельном поле, спектр 3 — в спокойной области Солнца. Сравнение спектров 1 и 2 показывает многократное усиление линии FeI в  $\lambda_{\text{eff}} = 1082.837$  нм и заметное усиление легкого изотопа  $^3\text{He}$  в области восходящего потока — протуберанца — на границе АО и КД по сравнению с наблюдениями над факельными полями этой АО. Зеемановское расщепление линий  $^4\text{He}$  в  $\lambda_{\text{eff}} = 1083.03$  нм дает оценку для магнитного поля  $B = (1350 \pm 100)$  Гс, а по линии FeI в  $\lambda_{\text{eff}} = 1082.837$  нм  $B = (1950 \pm 100)$  Гс.

Отсюда можно получить оценку для градиента магнитного поля в восходящем потоке протуберанца. Линия

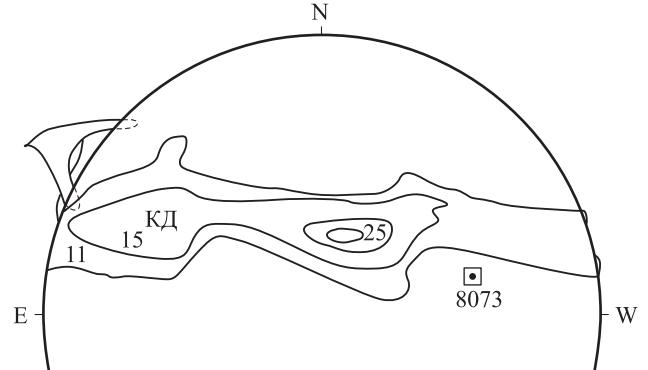


Рис. 3. Наблюдения большого протуберанца в линии HeI  $\lambda = 1083.0$  нм 20.08.1997

HeI  $\lambda = 1083.0$  нм образуется в верхней хромосфере и начале переходной области на высотах порядка 1700–2000 км над основанием фотосферы, а линия FeI — в фотосфере на высоте  $\sim 100$  км. То есть, градиент магнитного поля в потоке на высотах фотосфера — верхняя хромосфера порядка  $\Delta H \approx 0.3$  Гс/км для рассматриваемого случая.

Яркий пример наблюдения ускоренных потоков плазмы в шировых магнитных полях на границе КД и АО вне вспышек описан нами в работе [10], где представлены спектры в линии HeI  $\lambda = 1083.03$  нм, наблюдавшиеся в различных спокойных и активных областях на диске. Практически все случаи наблюдения ускоренных потоков, возникающих на границе КД с АО, сопровождаются заметным увеличением (от двух до пяти раз) отношения

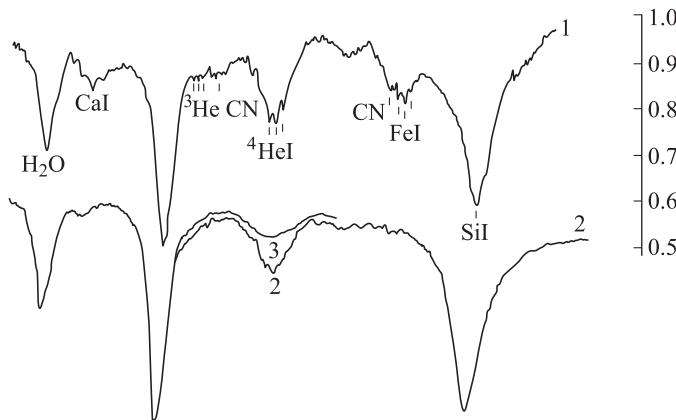


Рис. 4. Спектры в области линии гелия: 1 — в области поднимающегося потока на границе КД и АО, 2 — в факельном поле АО и 3 — в спокойной атмосфере

$^3\text{He}/^4\text{He}$  и значительным усилением линии железа FeI  $\lambda = 1082.837$  нм.

Отметим также тот факт, что на наших спектрах, полученных в восходящих потоках, наблюдаемых на границах КД и АО, почти всегда увеличению отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и усилению линии FeI сопутствует расширение на 10–20% контуров линии HeI  $\lambda = 1083.030$  нм и линии SiI  $\lambda = 1082.714$  нм (см. спектры на рис. 2, а и 4). Уширение этих линий свидетельствует об увеличении тепловых и турбулентных скоростей частиц фотосферных (наблюдаемых в линии SiI) и хромосферных (в линии гелия) слоев атмосферных потоков плазмы.

### Заключение

В обзоре [12] дан подробный анализ возможных механизмов обогащения плазмы солнечных вспышек и солнечных космических лучей изотопом  $^3\text{He}$  и другими изотопами легких элементов. Одним из наиболее вероятных механизмов обогащения солнечной плазмы изотопом  $^3\text{He}$  является, на наш взгляд, следующий вариант. Изотопы  $^3\text{He}$  не могут эффективно образовываться в атмосфере Солнца из-за недостаточно высоких температур и плотностей. Однако в более глубоких подфотосферных слоях физические условия допускают образование достаточного количества  $^3\text{He}$  за счет ядерных реакций, идущих с образованием дейтерия и затем быстрого его превращения в  $^3\text{He}$ . Затем этот  $^3\text{He}$  может эффективно выноситься в атмосферу Солнца в АО, т. е. в местах с сильными магнитными полями, а также в областях взаимодействия и пересоединения магнитных потоков [15]. Согласно современным представлениям, пересоединение магнитных потоков может эффективно осуществляться на двух уровнях в атмосфере Солнца, которые имеют, казалось бы, совершенно разные электродинамические свойства — в короне и в фотосфере в области температурного минимума. В работе [16], например, показано, что генерация потоков частиц с большим содержанием изотопов  $^3\text{He}$  может иметь место во время вспышек в верхней хро-

мосфере и короне в условиях сильно неизотермичной плазмы с ионно-звуковой турбулентностью. В отличие от корональных условий высокая эффективность пересоединения в области температурного минимума связана не с возбуждением плазменной турбулентности в пересоединяющем токовом слое [15], а просто с малой классической проводимостью слабоионизованной плазмы нижней атмосферы Солнца.

Одним из следствий пересоединения в области температурного минимума является наблюдение значительного потока вещества из фотосферы в корону. Об этом свидетельствует и расширение спектральных линий SiI и  $^4\text{HeI}$  на наших спектрах. Этого потока достаточно для формирования больших протуберанцев, наблюдавшихся над фотосферной нейтральной линией магнитного поля. Процесс пересоединения в биполярной активной области, сопровождающийся потоками ускоренного вещества в корону, часто осуществляется при наличии рядом с активной областью корональной дыры — крупномасштабного униполярного образования с почти вертикальным магнитным полем. Как показывают наши наблюдения, этот процесс сопровождается выносом из подфотосферных слоев ускоренных частиц, богатых  $^3\text{He}$  и FeI.

### Список литературы

1. Harvey J.W., Sheeley N.R., Jr. // Space Science Rev. 1979. **23**. P. 139.
2. Wang Y.-M., Hawley S.H., Sheeley N.R., Jr. // Science. 1996. **271**. P. 464.
3. Kahler S.W., Hudson H.S. // Astrophys. J. 2002. **574**. P. 467.
4. Козлова Л.М., Сомов Б.В. // Астрон. журн. 2000. **77**, № 6. С. 460.
5. Козлова Л.М. Физика Солнца и космическая электродинамика // Тр. ГАИШ. 2001. **71**. С. 199.
6. Majarska M.S., Doyle J.G., van Driel-Gesztelyi L. // Astrophys. J. 2004. **603**. L. 57.
7. Corti G., Poletto G., Suess S.T. et al. // Astrophys. J. 2007. **659**, L. 1702.
8. Wang Y.-M., Pick M., Mason G.M. // Astrophys. J. 2006. **639**, P. 495.
9. Сомов Б. В., Козлова Л. М. // Астрон. журн. 1998. **75**, № 6. С. 926.
10. Козлова Л.М., Сомов Б.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. **70**, № 1. С. 72.
11. Litvinenko Yu.E., Somov B.V. // Solar Phys. 1994. **151**, P. 265.
12. Козлова Л.М., Сомов Б.В. // Кинем. и физика небесных тел. 1999. **15**, № 1. С. 38.
13. Ситник Г.Ф., Козлова Л.М., Дивлекеев М.И. // Астрон. журн. 1988. **65**, № 6. С. 1283.
14. Fred M., Tomkins F.S., Brody J.K. et al. // Phys. Rev. 1951. **82**, № 3. P. 406.
15. Somov B.V. Plasma Astrophysics. Pt. II. Reconnection and Flares. N. Y., 2006.
16. Кочаров Г.Е. Ядерные процессы в атмосфере Солнца и проблема генерации ускоренных частиц // ВИНИТИ. Итоги науки и техники. Сер. Астрон. М., 1987. **32**. С. 43.

**On ejections of solar plasma enriched by  $^3\text{He}$  and FeI on boundaries of coronal holes****L. M. Kozlova<sup>a</sup>, B. V. Somov***Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.  
E-mail: <sup>a</sup>kozlova-lm@yandex.ru.*

To study the increased solar activity at the boundaries of coronal holes we investigate the spectrum and spectroheliograms in the IR line HeI  $\lambda = 1083.03$  nm, received on the horizontal Solar telescope of the Sternberg State Institute of Astronomy at M. V. Lomonosov Moscow State University. Our observations demonstrate an increase of the plasma flows at the boundary between coronal hole and bipolar active region. The spectrum in the vicinity of the  $^4\text{HeI}$   $\lambda = 1083.030$  nm shows an essential increase in the lines of the isotopes  $^3\text{He}$   $\lambda = 1083.168$  nm and FeI  $\lambda = 1082.837$  nm. Acceleration of the flows of the solar plasma at the boundary of coronal hole in the immediate vicinity of the active region appear, probably, due to reconnection of the magnetic fields of the bipolar structures of the active region and unipolar field of coronal hole. We discuss the nature of the enrichment of particles with the  $^3\text{He}$  and FeI in upflows at the boundary of coronal holes.

*Keywords:* Sun, coronal holes, active regions, magnetic fields, magnetic reconnection.

PACS: 96.60.qd.

*Received 22 September 2008.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2009).

**Сведения об авторах**

1. Козлова Людмила Матвеевна — научн. сотр.; тел.: 522-02-14, e-mail: kozlova-lm@yandex.ru.
2. Сомов Борис Всеволодович — д. ф.-м. н., профессор; тел.: 939-16-44.