

УДК 523.982-337; 523.9-7

ЭФФЕКТ ГЕЛЬФРЕЙХА–ЛУБЫШЕВА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА МИКРОВОЛНАХ

© 2016 Н. Г. Петерова^{1*}, Н. А. Топчило²

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Поступила в редакцию 5 октября 2016 года; принята в печать 25 февраля 2016 года

Приведены результаты наблюдений на РАТАН-600 тонкой структуры изображения источника циклотронного микроволнового излучения (ИЦМИ), располагающегося в короне Солнца над главным пятном активной области NOAA 11899. По сравнению с более ранними, в основном эпизодическими, наблюдениями ИЦМИ регулярные наблюдения на РАТАН-600 с большой достоверностью показали, что изменение структуры изображения ИЦМИ в зависимости от угла зрения в рассмотренном случае носит геометрический характер. Особенности изменений изображения в общих чертах согласуются с расчетами, выполненными Гельфрейхом и Лубышевым в рамках самой простой модели атмосферы над солнечным пятном. Результаты их расчетов получили широкое распространение и часто используются для интерпретации наблюдений.

Ключевые слова: *солнечные пятна — Солнце: радиоизлучение — Солнце: магнитная топология — Солнце: атмосфера*

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные пятна — участки поверхности Солнца, где сильные магнитные поля (2–4 КГс) выходят из-под фотосферы в корону, — наблюдаются на диске Солнца в радиодиапазоне как самые яркие детали источника микроволнового излучения, расположенного над квазиспокойными (вне вспышек) активными областями. Основным механизмом генерации этого излучения принято считать тепловой магнитотормозной (циклотронный) механизм на низких гармониках гирочастоты, преимущественно 2-й и 3-й [1]. Характер наблюдаемого спектра потоков пятен, их яркостной температуры и степени поляризации обусловлен крутым, на два порядка, ростом электронной температуры над пятном от хромосферных до корональных значений (2–4 МК), а также уменьшением напряженности магнитного поля (МП) с высотой. Вследствие сильной зависимости оптической толщи от угла между лучом зрения и направлением МП, изображение ИЦМИ должно сильно меняться в зависимости от положения пятна на диске Солнца [2]. При этом возможно появление мелкоаппаратурных деталей, для обнаружения которых необходимы наблюдения с высоким разрешением вплоть до одной угловой секунды. Для проверки наших

представлений о природе излучения ИЦМИ, а также уточнения физических параметров горячей корональной плазмы, находящейся в присутствии сильного магнитного поля, необходимо детальное сопоставление модельных расчетов с высокоточными наблюдениями, выполненными с хорошим пространственным разрешением.

Тонкие особенности изображения ИЦМИ впервые были замечены при наблюдениях солнечного затмения 7 марта 1970 г. на волне 4.5 см [3]. На границе одного из крупных пятен была обнаружена узкая кайма, шириной приблизительно 4", со степенью круговой поляризации излучения, близкой к 100%. Возникновение таких особенностей было очевидно из теории циклотронного излучения для ИЦМИ [2], однако с появлением крупных радиointерферометров стали необходимы более детальные модельные расчеты *двумерных* изображений ИЦМИ. Впервые это было сделано в работе [4] в рамках упрощенных представлений как о структуре МП, выходящего в солнечную корону, так и о высотном распределении температуры и плотности. При этом было показано, что модельные изображения ИЦМИ в картинной плоскости имеют вид кольца или серпа, меняющих свою форму в зависимости от положения пятна на диске Солнца (мы предлагаем называть это явление эффектом Гельфрейха–Лубышева (Г–Л)). Аналогичные ре-

*E-mail: peterova@yandex.ru

зультаты позднее были получены в работе [5], в которой корональное магнитное поле рассчитывалось путем экстраполяции реально измеренных фотосферных МП.

Высокое угловое разрешение на микроволнах, необходимое для наблюдений тонкой структуры изображения ИЦМИ, достигается в наблюдениях солнечных затмений или при использовании радиотелескопов апертурного синтеза, таких как WSRT, VLA и OVRO. С помощью указанных инструментов на Солнце наблюдалось достаточно много (порядка 50) активных областей в диапазоне 2–20 см [6–11] и др. Большая часть результатов получена с разрешением 2''–4'' для интерферометров и несколько худшим, 4''–6'', во время затмений. Во многих случаях выявлялась кольцеобразная или подковообразная структура наблюдаемых распределений яркостной температуры, причем в центре изображения отмечались как провалы яркости над тенями пятен, так и их отсутствие. Чаще всего это интерпретировалось как проявление эффекта Г–Л. Однако поскольку, как правило, эти наблюдения были эпизодическими и кратковременными и не могли явно продемонстрировать динамику эффекта Г–Л, такое утверждение являлось недостаточно обоснованным. Возможно, вследствие этого иногда предлагаются и другие варианты интерпретации особенностей наблюдаемых изображений ИЦМИ с помощью сложной модели магнитных полей пятен и распределений температуры и плотности над ними [10–12].

В эпоху наблюдений с умеренным угловым разрешением (1'–3') геометрические эффекты изучались в рамках исследования направленности излучения. В частности, такого рода исследование [13] предшествовало работе [4]. С несколько большим угловым разрешением (10''–20'') по наблюдениям на радиогелиографе Nobeyama (NoRH) и Сибирском Солнечном Радиотелескопе, что важно, ведущимся регулярно, исследовалась направленность излучения ИЦМИ. И в одном случае [14] замечены изменения максимальной яркости, которые носят геометрический характер — на короткой волне 1.76 см яркость минимальна при нахождении пятна на центральном меридиане Солнца и симметрично возрастает (примерно в три раза) с приближением пятна к E–W лимбам. Этот результат может быть интерпретирован как проявление эффекта Г–Л, однако для однозначного заключения необходимо было бы описать и проанализировать, как смещался центр тяжести излучения относительно геометрического центра пятна.

В нашей работе мы предлагаем исследование, специально посвященное эффекту Г–Л, на примере конкретного пятна, используя наблюдения, позволяющие проследить весь цикл изменений изображения ИЦМИ от восхода до захода АО за

солнечный лимб. Текущий цикл Солнца отличается повышенным количеством пятен, которые можно считать правильными (круглыми) пятнами и потому наиболее подходящими для поиска и исследования проявлений эффекта Г–Л. Выбрана активная область NOAA 11899 (ноябрь 2013 г.), состоявшая фактически из одного пятна большого размера и, что важно для сопоставления, проходившая практически через центр диска Солнца, где эффект Г–Л должен проявляться наиболее контрастно.

2. ОПИСАНИЕ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 11899

Активная область NOAA 11899 (широта $\varphi = 4^\circ - 7^\circ \text{N}$, ПЦМ — момент прохождения через центральный солнечный меридиан — 18 ноября 2013 г.) отличалась стабильностью и простотой морфологической и магнитной структуры (класс C-D-N и $\alpha - \beta$ соответственно). На фотогелиограмме (см. рис. 1 и рис. 3) она выглядит как одиночное пятно южной (S) полярности, почти правильной формы, в момент ПЦМ имевшее размеры полутени приблизительно 80''. Согласно данным наземных и спутниковых наблюдений, площадь пятна (тень+полутень), составляющая 745 ± 30 м.д.п. (1 м.д.п. = $10^{-6} S_\odot$, где S_\odot — площадь полусферы), а также его морфология, менялись незначительно (см. рис. 1 и таблицу).

Кроме морфологии, выбор АО 11899 для изучения эффекта Г–Л определялся ее положением на диске Солнца — она была низкоширотной ($\varphi = 4^\circ - 7^\circ \text{N}$) и, что удачно, северный полюс Солнца в этот период был наклонен в направлении Земли (в ПЦМ угол $b \approx 2.5^\circ$). Благодаря этому обстоятельству минимальное угловое расстояние, на котором центр тени пятна прошел от центра диска (т.е. угол зрения θ) оказалось равным всего $3^\circ 25'$. Момент максимального сближения достигался 18 ноября 2013 г. в 16:06 UT. Из имеющихся радионаблюдений наиболее близкими к нему по времени были наблюдения на РАТАН-600 ($\theta \approx 5^\circ$, см. таблицу).

Изменения МП пятна в процессе прохождения по диску Солнца были незначительны. Вспышечная активность NOAA 11899 была слабой и завершилась до прохождения группой центрального меридиана. Благоприятным обстоятельством являлась также очень хорошая изолированность АО 11899 от соседних АО (см. вставки на рис. 1), что немаловажно для анализа наблюдений, проводимых с одномерным угловым разрешением, в частности, как на РАТАН-600, на материалах которого базируется наше исследование.

В целом приведенные выше характеристики АО 11899 позволяют считать пятно стабильным

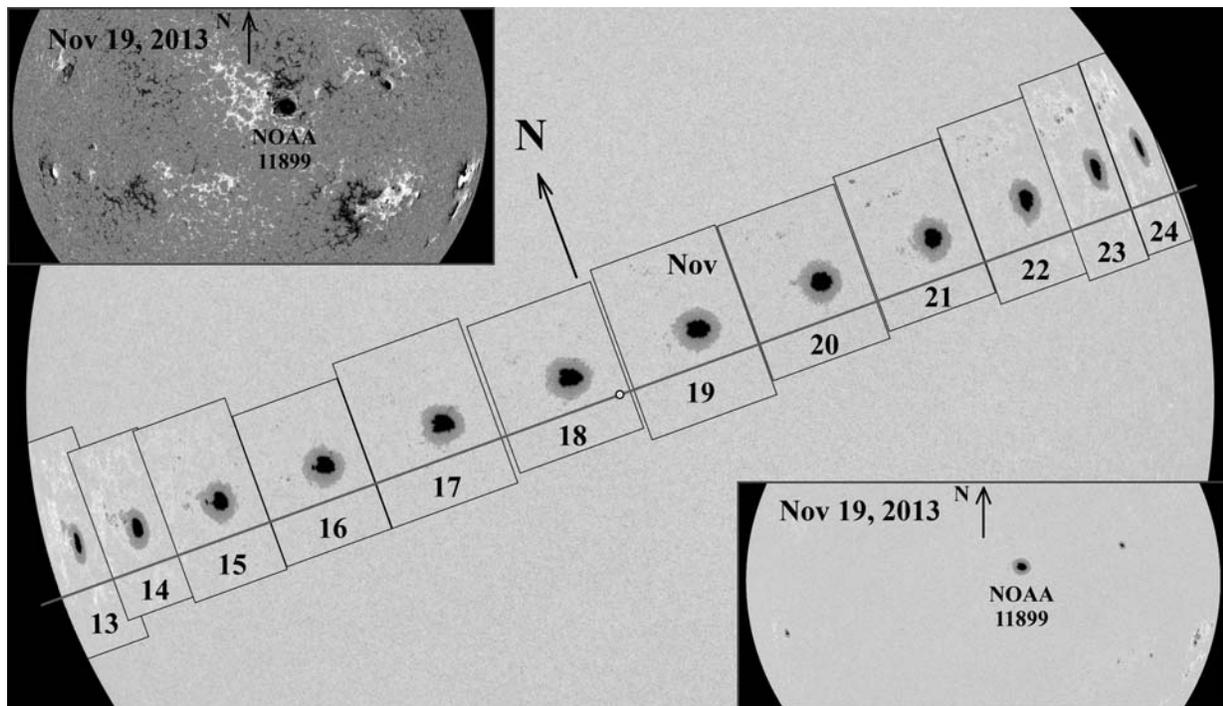


Рис. 1. Вид и положение пятна в группе NOAA 11899 на моменты наблюдения на РАТАН-600 за весь период нахождения группы на диске Солнца с 13 по 24 ноября 2013 г. (даты указаны снизу). Белый кружок — центр диска Солнца. На вставках вверху слева и внизу справа представлены магнитограмма и фотогелиограмма поясов активности Солнца за 19 ноября 2013 г. по данным SDO/HMI.

(по крайней мере, в период ПЦМ) и связывать описываемую далее динамику ее ИЦМИ с проявлением специфической направленности излучения (эффектом Г–Л).

3. НАБЛЮДЕНИЯ, ИХ ОБРАБОТКА И ЕЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследовании использованы данные регулярных стандартных спектрально-поляризационных наблюдений Солнца, выполняющихся на радиотелескопе РАТАН-600, из архива Радиоастрономического центра прогноза солнечной активности¹. Начиная с 2011 г. частотное разрешение аппаратуры РАТАН-600 доведено до 1% [16], что позволяет детально исследовать спектральные характеристики АО. Наблюдения анализировались с помощью штатного алгоритма обработки. Наилучшее одномерное угловое разрешение РАТАН-600 составляет 14'' и ухудшается пропорционально увеличению длины волны, составляя в середине диапазона примерно 40'' (на волне 5 см). Приведенные результаты наблюдений относятся к моменту местной кульминации Солнца (приблизительно 8:59 UT). В качестве дополнительного материала использовались данные космических обсерваторий SDO

(инструменты HMI и AIA) и Hinode (SOT/SP), взятые на моменты, максимально приближенные ко времени наблюдения на РАТАН-600 (характерная разность моментов с SDO менее 1 минуты).

Полученные на РАТАН-600 спектры радиоизлучения (см. рис. 2) показали типичную для циклотронного излучения пятен картину: поток быстро растет в диапазоне 2–5 см, степень поляризации на коротких волнах близка к 100% и падает с ростом длины волны. Форма спектра стабильна с небольшой динамикой, вероятно, связанной с изменениями величины площади и МП пятна.

Обычно изображение ИЦМИ компактного, не сильно раздробленного пятна по данным РАТАН-600 имеет вид гладкой кривой, внешне похожей на гауссиану. Такой вид ИЦМИ сохраняется от самых длинных волн, где он определяется формой диаграммы направленности телескопа, до самой короткой, на которой еще возможна генерация циклотронного излучения при имеющейся напряженности МП. И хотя для больших пятен углового разрешения РАТАН-600 на коротких волнах уже достаточно для явного отображения тонкой структуры, тем не менее обычно изменяется только размер источника, но не его форма. В случае же АО 11899, несмотря на почти круговую симметрию пятна, обнаруживается тонкая структура

¹<http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>.

Динамика площади (Sp), магнитного поля (B) и угла зрения (θ) головного пятна группы NOAA 11899

Data, 2013	Sp , msh ¹⁾	Sp , msh ¹⁾	B , Gs ²⁾	B , Gs ³⁾	B , Gs ⁴⁾	θ_{Nob} , °	θ_{Ratan} , °	Flares, GOES
	Debrec.	Debrec.	CRAO	SDO/HDI	Hinode			
	Ground	SDO/HDI						
	about 0 ^h	8 ^h 59 ^m	0 – 9 ^h	0 ^h UT	about 12 ^h	2 ^h 44 ^m	8 ^h 59 ^m	
15.11	765	771	2800	3750	–	47.7	44.3	M1.0
16.11	762	718	2500	3840	–	34.3	30.9	–
17.11	706	674	–	3910	–	20.9	17.5	C1.7
18.11	721	725	–	3710	–	8.0	5.1	–
19.11	813	724	–	3690	4190	6.8	10.0	–
20.11	755	728	3200	3570	4340	19.5	22.9	–
21.11	801	765	–	3560	4250	32.7	36.2	–
22.11	748	752	–	3500	4080	46.1	49.1	–

¹⁾ Согласно данным обсерватории Дебрецен (http://ienyi.solarobs.unideb.hu/deb_obs_en.html) [15].

²⁾ Согласно измерениям КрАО (<http://solar.crao.crimea.ua/data/sunspots/>).

³⁾ Максимальное значение магнитной индукции в тени пятна, рассчитанное нами по оригинальным картам полного вектора магнитного поля SDO/HMI (<http://jsoc.stanford.edu/ajax/exportdata2.html>), сглаженным для уменьшения инструментальных шумов.

⁴⁾ То же самое по данным HINODE (<http://www.csac.hao.ucar.edu/csac/archive.jsp#Hinode>).

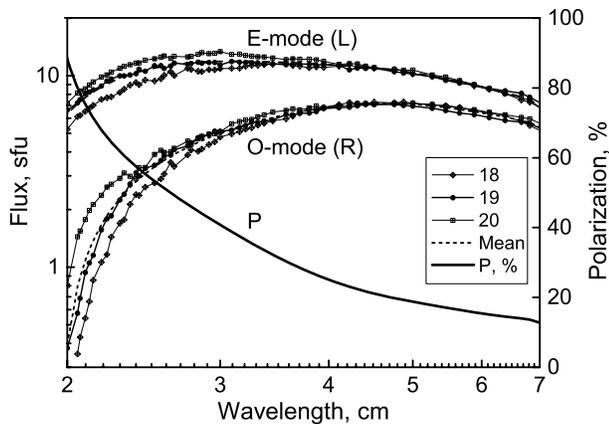


Рис. 2. Спектры плотности потока излучения ИЦМИ пятна в NOAA 11899 в период прохождения центрального меридиана 18–20 ноября 2013 г. по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 отдельно в обеих модах (Е и О). Mean — средние значения потока за эти три дня для Е- и О-мод, P — спектр степени поляризации, вычисленный с использованием этих значений.

его изображения, претерпевающая значительные быстрые изменения.

На рис. 3 представлена вся совокупность сканов ИЦМИ по наблюдениям РАТАН-600 в диапазоне 1.65–10 см за три дня вблизи момента прохождения пятна через центральный меридиан Солнца,

когда изменения тонкой структуры наиболее заметны (см. подробнее [17]). Видно, что на длинных волнах тонкая структура изображения отсутствует, что может быть связано с недостаточным угловым разрешением РАТАН-600.

Наиболее контрастно тонкая структура изображения и ее изменения проявляются в коротковолновом диапазоне, что продемонстрировано в большем масштабе на рис. 4, где представлены изменения структуры изображения за шесть дней наблюдений. Видно, что тонкая структура изображения вблизи ПЦМ сильно меняется с изменением угла зрения (углы наблюдения θ_{Ratan} приведены в таблице). В день, когда угол зрения в момент наблюдения ($\theta \approx 5^\circ$) был наиболее близок к минимальному (19 ноября 2013 г.), изображение ИЦМИ имеет симметричный “двугорбый” характер, что свидетельствует о наличии сильного потемнения в центральной части пятна. В соседние дни (18 ноября и 20 ноября) симметрия исчезает, и наиболее ярким становится внешний край ИЦМИ, смещенный при нахождении пятна в восточном полушарии Солнца 18 ноября 2013 г. к Е-лимбу Солнца, а в западном полушарии 20 ноября 2013 г. — к W-лимбу. С дальнейшим увеличением угла зрения направление Е–W асимметрии в обоих полушариях сохраняется, но величина асимметрии быстро уменьшается, и источник приобретает «стандарт-

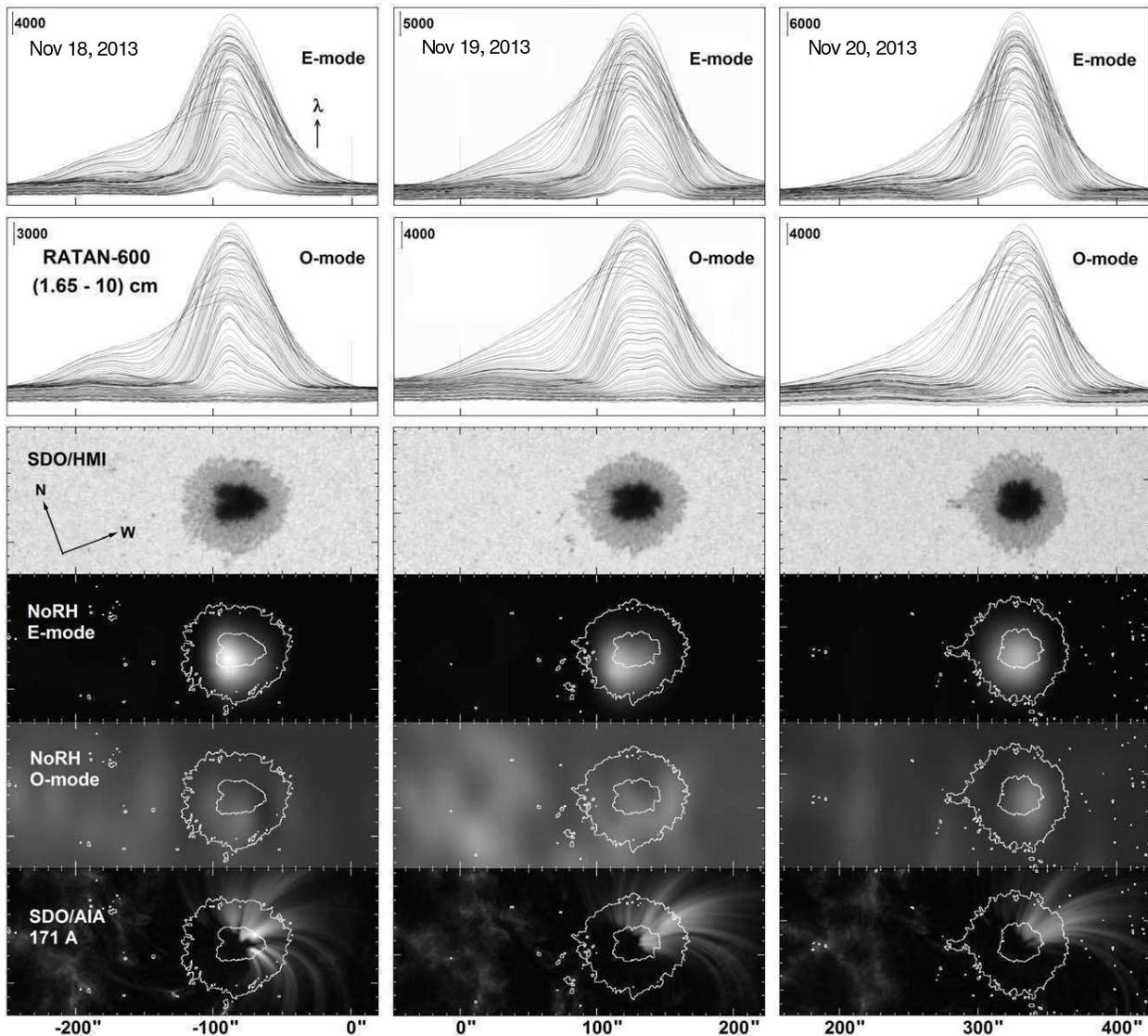


Рис. 3. Сканы NOAA 11899 в диапазоне 1.65–10 см за три дня 18–20 ноября 2013 г. вблизи момента ПЦМ, отдельно в E- и O-модах, по наблюдениям на RATAN-600. Стрелкой со значком λ указано направление увеличения их длины волны, а тонкими вертикальными линиями отмечено прохождение диаграммы направленности телескопа через центр диска Солнца. Сканы представлены в шкале антенных температур. Наблюдения на RATAN-600 сопоставлены с данными SDO/HMI — фотогелиограммой и изображением пятна в УФ-диапазоне в линии 171 Å и наблюдениями на радиогелиографе Nobeyama в E- и O-модах. Белыми изолиниями на картах изображены границы тени и полутени пятна. Карты приведены в угловых секундах по обоим осям в прямоугольной солнечной системе координат, повернутой на угол наклона оси вращения Солнца (см. рис. 1).

ный» симметричный вид. На длинных волнах тонкая структура и асимметрия изображения замываются вследствие ухудшения углового разрешения RATAN-600, а также перспективного сокращения размеров ИЦМИ при приближении пятна к лимбу.

Приведенные на рис. 3 двумерные изображения по данным радиогелиографа Nobeyama на волне 1.76 см подтверждают полученные нами на RATAN-600 результаты. Сравнивая изображения пятна на NoRH (четвертый сверху ряд рисунков) с коротковолновыми RATAN-сканами (нижние кри-

вые на верхнем ряде рисунков), можно увидеть, что максимум яркости в E-моде на NoRH смещается со временем слева направо относительно изображения пятна в оптическом диапазоне, подобно тому, как смещается максимум сигнала в E-моде на RATAN-сканах. Аналогичное смещение можно усмотреть и в O-моде NoRH (предпоследний ряд рисунков), но оно менее достоверно из-за слабости сигнала в этой моде (степень поляризации пятна на NoRH и на коротких волнах на RATAN-600 близка к 100%).

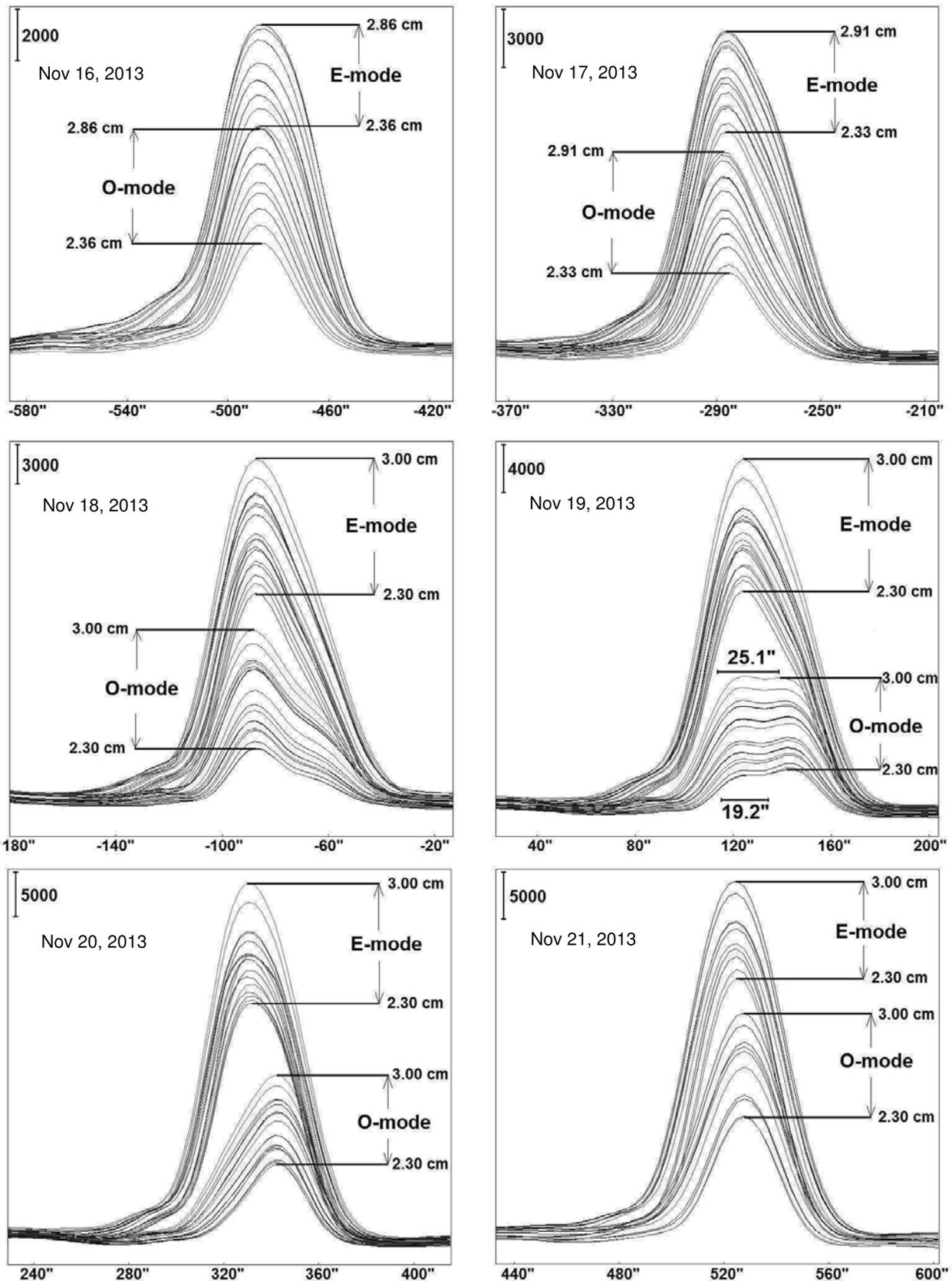


Рис. 4. РАТАН-сканы NOAA 11899 в диапазоне 2.3–3.0 см по наблюдениям за шесть дней 16–21 ноября 2013 г. Сканы представлены в шкале антенных температур. На кадре за 19 ноября 2013 г. указаны размеры диаграммы направленности РАТАН-600 на крайних волнах диапазона: 19.2" на 2.30 см и 25.1" на 3.00 см.

Анализируя приведенные на рис. 3 изображения, также можно заключить, что представленная тонкая структура радиоизображения не связана с наличием активности в пятне. Так, по данным SDO/AIA, петли, видимые в УФ, хоть и несколько изменяют свою интенсивность, но сохраняют свое положение в западной части пятна и не могут служить причиной наблюдаемого кардинального изменения направления асимметрии радиоисточника.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Модель Г–Л [4] построена для источника циклотронного излучения. Наблюдения, описанные в разделе 3, подтверждают, что радиоисточник над пятном в NOAA 11899 действительно имел такую природу излучения (см. рис. 2), являлся типичным циклотронным пятненным источником и был достаточно стабильным.

В рассмотренном нами случае отчетливо проявилась характерная особенность тонкой структуры наблюдаемого изображения источника излучения — депрессия яркости над центром пятна, наиболее контрастная в О-моду излучения, что и следовало ожидать согласно теории ИЦМИ [2]. Другая особенность, которую демонстрируют наблюдения, — это асимметрия сканов, увеличивающаяся с удалением от центра Солнца. Обе особенности качественно полностью соответствуют модельным двумерным изображениям пятна, рассчитанным в работе [4], что свидетельствует о принципиальной адекватности использованной модели. Заметим, что отмеченные особенности динамики изменений структуры изображения пятна были выявлены исключительно благодаря регулярности наблюдений на РАТАН-600, проводимых в широком диапазоне длин волн и с высоким частотным разрешением приемной аппаратуры [16].

Для подтверждения же степени обоснованности модели Г–Л как специфической физической модели структуры атмосферы над пятном необходимы или прямые наблюдения характерных двумерных структур (серпов/колец) или детальные численные расчеты, показывающие влияние двумерных структур на наблюдаемые одномерные сечения/сканы. При этом динамика изменения изображения пятна при движении по диску Солнца может служить решающим аргументом в пользу той или иной модели атмосферы.

Из многочисленных работ, выполненных ранее, где есть ссылки на работу Гельфрейха и Лубышева, выделяется работа [9], с которой целесообразно сопоставить наши результаты. Это единственная работа, посвященная специально поиску эффекта Г–Л, выполненная в широком диапазоне длин волн на основе спектрально-поляризационных наблюдений пятна в NOAA 4741

(август 1986 г.); это пятно, что очень важно, проходило через центр диска Солнца (как и в случае NOAA 11899). Пятно было небольших размеров (площадь 200–250 м.д.п., размер полутени порядка 35"), максимальная напряженность МП примерно равна 2400 Гс. Наблюдения проведены на интерферометре OVRO в диапазоне 4–12 ГГц практически в одномерном режиме с более высоким, чем на РАТАН-600, разрешением 6"8–2"2. В отличие от нашей работы, авторам [9] удалось проследить только вторую половину периода нахождения активной области на диске Солнца от центра до западного края диска (см. рис. 5а).

Сопоставление наблюдений показывает, что тонкая структура изображения пятна на РАТАН-600 четко проявляется в диапазоне 2–3 см (см. рис. 4), а на OVRO — на более длинных волнах, начиная с 3.6 см, — и не столь наглядно выражена. Различие изображений на коротких волнах вызвано главным образом различием в размерах пятен и величины МП (3200 Гс в NOAA 11899, 2400 Гс в NOAA 4741 по данным КраО). Различие же на длинных волнах может объясняться недостаточным угловым разрешением РАТАН-600, что подтверждается, например, затменными наблюдениями пятна в NOAA 11140 (площадь пятна приблизительно 180 м.д.п., расстояние 40° от центра диска Солнца, январь 2011 г.), выполненными на радиотелескопах РТ-32 ИПА РАН на волнах 3.5 см и 6.2 см с очень высоким угловым разрешением порядка 1" [18], где изображение ИЦМИ (см. рис. 5b) на обеих длинах волн имело «двугорбый» характер и асимметрию, характерную для эффекта Г–Л (рис. 5с).

В итоге, благодаря оптимально подобранным данным, представлен наблюдательный факт, надежно подтверждающий, что эффекты, предсказываемые моделью Г–Л (даже несмотря на ее упрощенный характер), существуют и выражаются в соответствующей этой модели модификации изображения ИЦМИ и смещениях центра тяжести излучения. Для прямого же выявления специфической для ИЦМИ двумерной тонкой структуры изображения (кольца, серпы) необходимо более высокое угловое разрешение, 2"–4", которое пока недостижимо при регулярных наблюдениях Солнца.

Значимость исследований эффекта Г–Л определяется их вкладом в развитие как методики наблюдений солнечных пятен, так и изучения физических параметров корональной плазмы над ними. Одной из самых трудных задач в исследованиях ИЦМИ является измерение его высоты над уровнем фотосферы, которая часто измеряется на основе смещения центра тяжести излучения

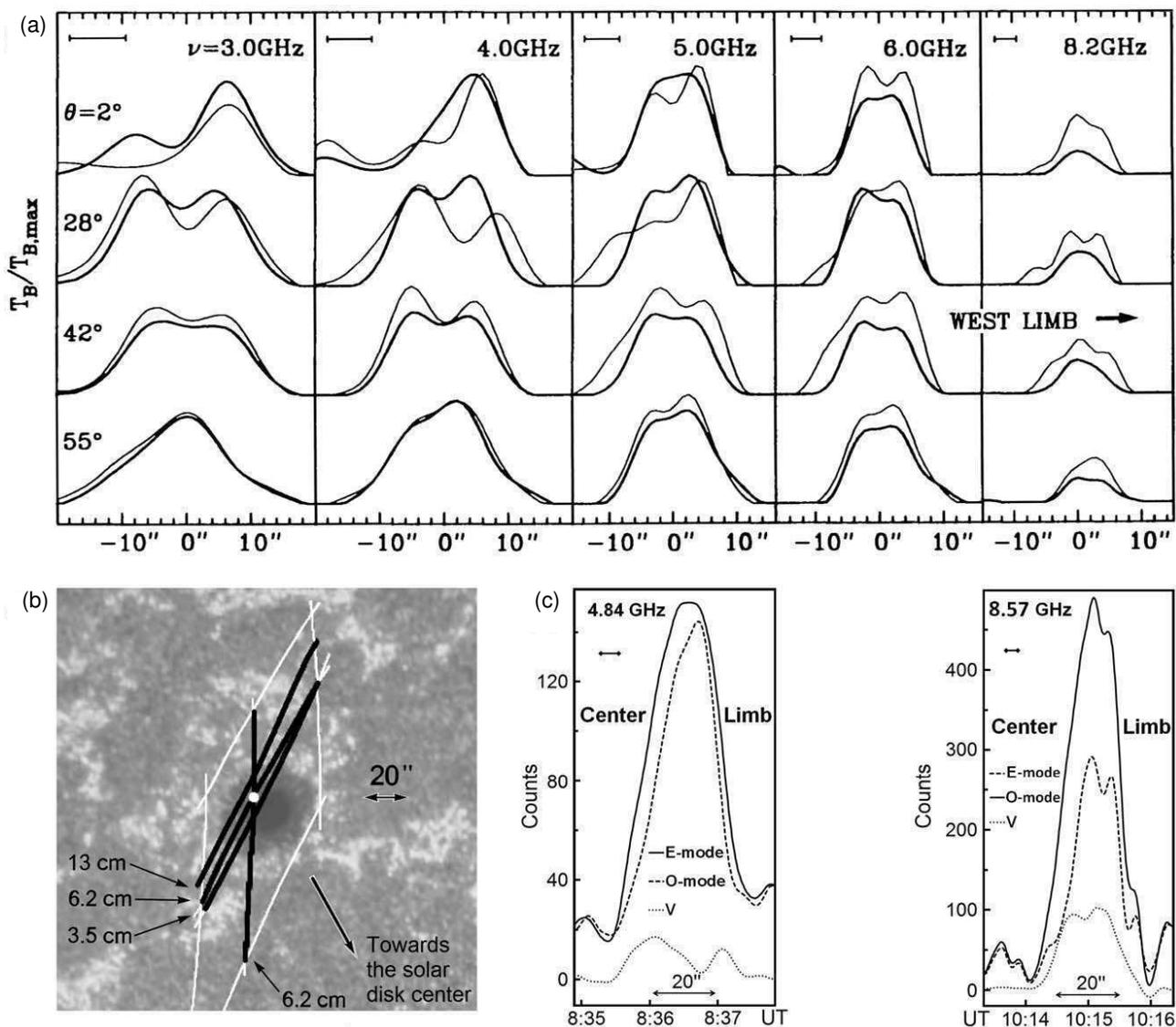


Рис. 5. Сопоставление тонкой структуры ИЦМИ по наблюдениям на разных инструментах: (а) OVRO-сканы NOAA 4741 в диапазоне 3–8.2 ГГц для углов зрения 2° – 55° в обеих модах излучения (Е-мода — тонкая линия, О — толстая), взятые из [9]; (б) фотогелиограмма АО 11140, на которой нанесено положение максимумов одномерных распределений яркости на трех длинах волн (черные линии) и центра тяжести излучения ИЦМИ на 6.2 см (светлая точка) по наблюдениям солнечного затмения 4 января 2011 г. на РТ-32 ИПА РАН [18]; (с) одномерное распределение яркости ИЦМИ над пятном в NOAA 11140 во время затмения на двух частотах (волны 3.5 и 6.2 см), близких к частотам наблюдений на OVRO. Надписями «Center» и «Limb» отмечены края источника, ближайšie к центру диска Солнца и лимбу соответственно. Угловое разрешение наблюдений на всех сканах указано слева вверху и для затмения выбрано близким к разрешению на OVRO.

ИЦМИ относительно геометрического центра пятна. Методика этих измерений должна учитывать, что оба эффекта (высоты и угла зрения) качественно одинаково влияют на смещение центра тяжести, сдвигая его в направлении к лимбу. При больших углах зрения эффект высоты сопоставим с эффектом Г–Л, на малых — мешающее влияние эффекта Г–Л значительно сильнее. Это может приводить к значительному завышению результатов измерения высоты ИЦМИ, особенно при использовании

наблюдений в центральной части диска Солнца, как на это было ранее указано в [2]. Например, в случае NOAA 11140 (см. рис. 5с) центр тяжести ИЦМИ смещен к лимбу от геометрического центра пятна приблизительно на $10''$. Если не учитывать эффект Г–Л, оценка высоты может получиться с ошибкой около 100%.

В заключение вслед за авторами работы [5] подчеркнем, что эффект Г–Л обусловлен исключительно зависимостью оптической толщи источника

микроволнового излучения над солнечным пятном от угла зрения, под которым он наблюдается. И ни в коем случае нельзя рассматривать структурные особенности ИЦМИ (кольца), выявляемые в наблюдениях как однозначное свидетельство существования локальных мелкомасштабных источников высокотемпературной плазмы в пятне, без проверки на эффект Г–Л.

С другой стороны имеется ряд безусловных случаев, когда наблюдаются внешне похожие структуры (кольца/серпы), не являющиеся тем не менее следствием эффекта Г–Л [12]. Главное их видимое отличие состоит в том, что в этих случаях максимум яркости может располагаться в любом месте пятна, тогда как при эффекте Г–Л он всегда должен быть смещен в направлении от центра Солнца. Как показано в работе [11], при этом отличие реальных параметров плазмы от упрощенных модельных столь велико, что маскирует эффект Г–Л, чем и объясняются трудности и малочисленность наблюдений этого эффекта в «чистом» виде, как в случае NOAA 11899.

5. ВЫВОДЫ

(1) Впервые приведены результаты наблюдений, с большой достоверностью подтверждающие существенное специфическое влияние угла зрения на изображения солнечного пятна при наблюдениях на микроволнах, выражающееся в появлении в изображении кольцеобразных и серповидных структур. Предложено называть это явление эффектом Гельфрейха–Лубышева, первыми (1979 г.) рассчитавших двумерную модель этого явления, получившую широкое распространение.

(2) Показаны преимущества наблюдения эффекта Г–Л в коротковолновом диапазоне длин волн, где из-за резкого градиента температур он проявляется наиболее контрастно.

(3) Указано, что эффект Г–Л необходимо всегда учитывать при измерениях высоты источника циклотронного излучения, лежащего в короне над солнечным пятном.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны всему коллективу РАТАН-600 за возможность использовать в свободном доступе результаты наблюдений Солнца, а также коллективам, чьи наблюдательные данные были дополнительно привлечены для интерпретации радионаблюдений: Дебреценская гелиофизическая обсерватория (ДНО). Наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт

№14.518.11.7054, шифр 2012-1.8-16-518-005). Данные и изображения SDO/HMI любезно предоставлены NASA/SDO и научными коллективами AIA, EVE и HMI. HINODE является японским космическим проектом, разработанным и запущенным ISAS/JAXA в партнерстве с NAOJ, и NASA и STFC (Великобритания) в качестве международных партнеров. Проект управляется названными организациями с сотрудничеством с ESA и NSC (Норвегия). Выражаем особую благодарность команде радиогелиографа Nobeyama, управляемого коллективом NAOJ/Nobeyama Solar Radio Observatory, за отличное качество предоставляемых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. V. Zheleznyakov, *Radio Emission of the Sun and Planets* (Pergamon Press, Oxford, New York, 1969).
2. E. Ya. Zlotnik, *Sov. Astron.* **12**, 245 (1968); **12**, 464 (1968).
3. J. A. Quiñones, A. N. Korzhavin, N. G. Peterova, and J. Santos, *Bull. Solnechnye Dannye Akad. Nauk USSR* **1975**, 87 (1975).
4. G. B. Gel'freikh and B. I. Lubyshev, *Sov. Astron.* **23**, 316 (1979).
5. J. Hildebrandt, N. Seehafer, and A. Krüger, *Astron. and Astrophys.* **134**, 185 (1984).
6. K. R. Lang and R. F. Willson, *Astrophys. J.* **255**, L111 (1982).
7. C. E. Alissandrakis and M. R. Kundu, *Astrophys. J.* **253**, L49 (1982).
8. D. McConnel and M. R. Kundu, *Astrophys. J.* **279**, 421 (1984).
9. J. W. Lee, D. E. Gary, and G. J. Hurford, *Solar Phys.* **144**, 349 (1993).
10. A. Vourlidas, T. S. Bastian, and M. J. Aschwanden, *Astrophys. J.* **489**, 403 (1997).
11. E. Ya. Zlotnik, S. M. White, and M. R. Kundu, *ASP Conf. Ser.* **155**, 135 (1998).
12. C. E. Alissandrakis and M. R. Kundu, *Astron. and Astrophys.* **139**, 271 (1984).
13. B. I. Lubyshev, *Sov. Astron.* **21** (1), 74 (1977).
14. I. A. Bakunina, G. Ya. Smolkov, and S. D. Snegirev, *Radiophys. Quantum Electronics* **51** (8), 579 (2008).
15. L. Györi, T. Baranyi, and A. Ludmány, *IAU Symp.*, **273**, 403 (2011).
16. V. M. Bogod, A. M. Alesin, and A. A. Pervakov, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 205 (2011).
17. N. A. Topchilo, N. G. Peterova, in *Proc. XVIII All-Russian Annual Conf. on Solar and Solar-Terrestrial Physics — 2014*, Ed. by A. V. Stepanov, Yu. A. Nagovitsin (Main (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, St.-Petersburg, 2014), p. 419.
18. A. N. Korzhavin, N. G. Peterova, and N. A. Topchilo, *Geomagn. Aeron.* **52** (7), 867 (2012).

The Gelfreikh–Lubyshev Effect according to Microwave Observations of Sunspots**N. G. Peterova and N. A. Topchilo**

We report the results of RATAN-600 radio telescope observations of the fine structure of the source of cyclotron microwave emission (SCMR) located in the solar corona above the main sunspot of NOAA 11899 active region. Compared to earlier and mostly episodic observations of the SCMR, our regular observations with RATAN-600 radio telescope showed rather conclusively that the variation of the structure of the SCMR as a function of the angle of view in the present case is of geometric nature. The behavior of image variations generally agree with the computations performed by Gelfreikh and Lubyshev in terms of the simplest model of the solar atmosphere above the sunspot. The results of their computations are widely used for interpreting observations.

Keywords: *sunspots—Sun: radio radiation—Sun: magnetic topology—Sun: atmosphere*