

УДК 004.922:523.9

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН****Джимбеева Л.Н., Бембитов Д.Б., Манкаева Г.А., Утнасунова В.О., Джимбеева А.О.***ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова», Элиста,  
e-mail: dbembitov@gmail.com*

Целью исследования в данной статье является проведение компьютерной визуализации снимков Солнца, гелиограмм, взятых с соответствующих сайтов. Использование компьютерных программ позволяет получать изменения периметров объектов радиоисточников над пятнами и позволяет получать изменения площадей радиопятен, площадей поверхностей образований, что представляет собой интегральные потоки излучения в центральной части и всей области в целом, позволяющие получать объемы областей. Материалом исследования являются снимки поверхности Солнца с радиогелиографа Nobeyama, длина волны которых составляет 1,76 см с пространственным разрешением порядка  $10''$ , а также снимки, полученные в солнечной обсерватории SDO. Мы рассматривали солнечные пятна, которые являются активными образованиями на фотосфере Солнца, температура которых ниже температуры фотосферы, магнитное поле достигало порядка нескольких тысяч Гаусс. Интервалы наблюдений составляли от 1 минуты до 10 минут. Гелиограммы должны быть достаточно высокого качества, чтобы уровень интенсивности невозмущенной фотосферы Солнца был одинаковым. В нашей работе мы применили программу 3DFieldPro, которая использует карты глубины, представляющие собой записанные в файл расстояния точек, расположенных на поверхности объектов до камеры, а также 3DFieldPro является программой контуров и обработки 2D/3D данных. Эта программа позволяет конвертировать данные в контурные карты, поверхности и объемные схемы.

**Ключевые слова:** солнечное пятно, изолиния, площадь пятна, вейвлет-преобразование, Фурье-преобразование

**COMPUTER SIMULATION OF SUNSPOTS****Dzhimbееva L.N., Bembitov D.B., Mankaeva G.A., Utnasunova V.O., Dzhimbееva A.O.***Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikov, Elista, e-mail: dbembitov@gmail.com*

The purpose of the research in this article is to conduct computerized visualization of images of the Sun, heliograms taken from relevant sites. The use of computer programs allows you to receive changes in the perimeters of objects of radio sources over the spots and allows you to receive changes in the areas of radio voids, the areas of the surfaces of the formations, which is the integral radiation fluxes in the central part and the entire region as a whole, allowing to obtain the volumes of the regions. The study material is images of the surface of the Sun from the Nobeyama radio heliograph, whose wavelength is 1.76 cm with a spatial resolution of the order of  $10''$ , as well as images taken in the solar observatory SDO. We considered sunspots, which are active formations on the solar photosphere, the temperature of which is lower than the temperature of the photosphere, the magnetic field reached about several thousand Gauss. The observation intervals ranged from 1 minute to 10 minutes. The heliograms must be of sufficiently high quality so that the intensity level of the unperturbed photosphere of the Sun is the same. In our work, we used the 3DFieldPro program, which uses depth maps representing the distances of points located on the surface of objects to the camera, recorded in the file, and 3DFieldPro is a program of contours and 2D / 3D data processing. This program allows you to convert data into contour maps, surfaces and volumetric schemes.

**Keywords:** sunspot, isoline, spot area, wavelet transform, Fourier transform

На протяжении нескольких лет в учебных заведениях стремительно развиваются такие научные направления, как представление информации в виде графических данных и визуальная аналитика. Количество исследований в данных направлениях возрастает, так как расширяется спектр их применения. Представление информации в виде графических данных является одной из наиболее наукоемких областей современных информационных технологий.

К способам представления информации в виде графических данных можно отнести графики, таблицы, отчеты, схемы и так далее.

Представление информации в виде графических данных рассматривалось как вспомогательное средство при анализе экспериментальных данных в физике, хотя как теоретические, так и практические исследова-

ния позволяют говорить о ее самостоятельной роли.

В нашей работе мы применили программу 3DFieldPro (или 3DField), которая использует карты глубины, представляющие собой записанные в файл расстояния точек, расположенных на поверхности объектов до камеры, а также 3DFieldPro является программой контуров и обработки 2D/3D данных. Эта программа позволяет конвертировать данные в контурные карты, поверхности и объемные схемы.

В нашем исследовании мы использовали следующие возможности программы 3DFieldPro (или 3DField), а именно:

- интерполирование данных на сетку;
- возможность показывать месторасположение точек данных на плоскости и их значений относительно друг друга;

- графическое представление изображений в 2D/3D числовых массивов данных;
- построение карт изолиний на основе числовых данных;
- редактирование полученных изображений в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями;
- экспорт созданных карт любого размера в документы текстового редактора;
- возможность создавать трехмерную проекцию;
- возможность создавать группу изолиний с соответствующими коэффициентами;
- возможность определять длину изолиний;
- возможность определять площадь сечения объекта, ограниченной данной изолинией;
- возможность определять объем поверхности объекта, объем объекта;
- трансформация отсканированного графика в цифровую форму;

Цель исследования: проведение компьютерной визуализации снимков Солнца, гелиограмм, взятых с соответствующих сайтов. Использование компьютерных программ позволяет получать изменения периметров объектов радиосточников над пятнами и позволяет получать изменения площадей радиопятен [1], площадей поверхностей образований, что представляет собой интегральные потоки излучения в центральной части и всей области в целом, позволяющие получать объемы областей.

#### Материалы и методы исследования

Материалом исследования являются снимки поверхности Солнца с радиогелиографа Nobeyama, длина волны которых составляет 1,76 см с пространственным разрешением порядка 10", а также снимки, полученные в солнечной обсерватории SDO.

Мы рассматривали солнечные пятна, которые являются активными образованиями на фотосфере Солнца, температура которых ниже температуры фотосферы, магнитное поле достигало порядка нескольких тысяч Гаусс. Интервалы наблюдений составляли от 1 мин до 10 мин. Гелиограммы должны быть достаточно высокого качества, чтобы уровень интенсивности невозмущенной фотосферы Солнца был одинаковым. Это проверялось с помощью программы Adobe Photoshop CS5.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для примера на рис. 1 представлен снимок гелиограммы для примера, полученный 28 февраля 2017 г.

На рис. 2 представлены изменения периметра одного и того же объекта, полученного по снимкам Nobeyama и SDO. Корреляция двух кривых близка к единице, характер кривых по данным «Нобейма» и SDO практически одинаков. Разность фаз во всех точках пространства постоянна, что говорит о когерентности волн, то есть источник колебаний один и тот же, природа колебаний одинакова.

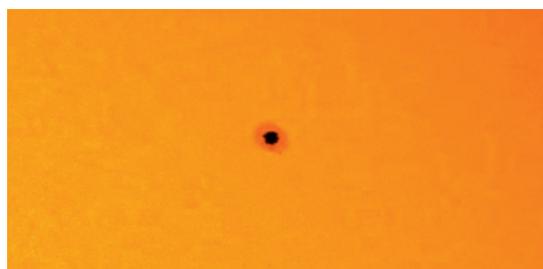


Рис. 1. Фрагмент снимка Солнца (28.02.2017)

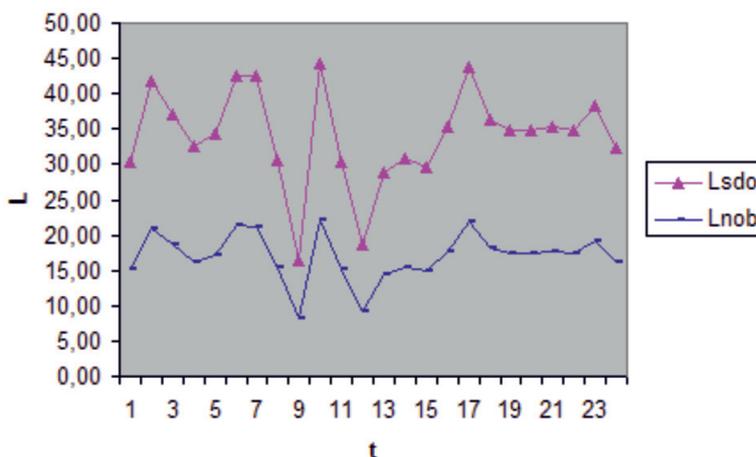


Рис. 2. Ход кривых длин изолинии солнечного пятна

Параметры тени и полутени солнечного пятна

$L_n$ – длина изолинии полутени	$L_T$ – длина изолинии тени	$L_n/L_T$	$S_n$ – площадь полутени	$S_T$ – площадь тени	$S_n/S_T$	$V_n$ – объем полутени	$V_T$ – объем тени	$V_n/V_T$
65,3882	54,3502	1,2	286,746	197,186	1,45	67029,7	48206,3	1,39
66,6326	54,3502	1,2	296,262	197,186	1,5	68235,8	48206,3	1,41
65,3702	56,3384	1,16	288,738	206,477	1,398	66353,3	50614,2	1,31
64,1286	54,5542	1,17	274,403	199,22	1,377	62915,3	49397	1,27
64,7811	52,8636	1,22	279,28	186,225	1,5	65123,9	44643,3	1,46
61,6578	52,5726	1,17	259,311	182,213	1,42	59511,2	43948	1,35
61,5405	52,406	1,17	257,997	181,627	1,42	60545,9	44440,4	1,36
62,5105	52,6686	1,186	261,703	180,711	1,45	60253,1	43657,4	1,38
67,1808	51,7558	1,298	274,691	178,603	1,54	63829,7	43114,	1,48
62,2612	51,0573	1,219	262,538	180,066	1,46	61498,6	43269,5	1,42
.....								
57,3447	48,7582	1,18	213,986	146,001	1,47	51683,9	35685,9	1,45
58,2758	49,1556	1,19	217,216	145,298	1,49	48712,5	35111,6	1,39
59,1704	49,9447	1,18	221,598	149,191	1,48	50198	35754,8	1,4
59,754	50,4453	1,18	222,59	147,622	1,5	50463,4	36043	1,4
59,5839	50,6945	1,17	226,682	152,097	1,49	51125,3	37085,5	1,37
59,9658	50,2361	1,19	239,723	160,286	1,49	52170,9	38830,6	1,34
60,1732	49,6141	1,21	236,056	153,398	1,53	54281,2	36877,3	1,47
58,7683	48,5904	1,21	224,794	147,337	1,52	51029,5	35267,8	1,44
58,7425	47,7794	1,23	235,351	150,679	1,56	54115,9	35652,2	1,52
58,6477	46,0753	1,27	235,979	147,904	1,59	53861,8	36254	1,48
65,2978	47,9116	1,36	269,674	157,267	1,71	61929,2	38639,3	1,6
61,1794	50,4459	1,21	245,904	169,863	1,44	57297,3	40278,3	1,42
67,5181	51,62	1,307	267,603	177,462	1,51	62600,4	44058,6	1,42
65,956	52,4256	1,26	275,007	186,955	1,47	63581,3	45815	1,39
65,4575	51,4629	1,27	280,843	185,44	1,51	65229,5	44697,8	1,46
63,0209	53,0135	1,19	266,557	183,174	1,45	62154,6	44328,7	1,40

В таблице впервые приведены данные для солнечного пятна, наблюдавшегося 01.02.1998 г.

По полученным результатам можно увидеть, что отношения периметра, площади и объема полутени к периметру, площади и объему тени солнечного пятна практически являются постоянной величиной, что не противоречит результатам рассмотренных ранее работ [2, 3]. На рис. 3 представлена 3D модель солнечного пятна, полученная с помощью программы 3DFieldPro.

Использование математического пакета Matlab дает возможность проводить анализ временных рядов с помощью Фурье и вейвлет-анализов. Исследование функций во временных и частотных интервалах с помощью прямого Фурье-преобразования и обратного Фурье-преобразования составляет основу Фурье-анализа. Они показали, что для функций с локальными особенностями представление сигналов в виде ряда Фурье оказывается малоэффективным, в частно-

сти как для импульсных, так и для цифровых сигналов и изображений [4]. Представим наши результаты по вейвлет-анализу, основываясь на вышесказанном.

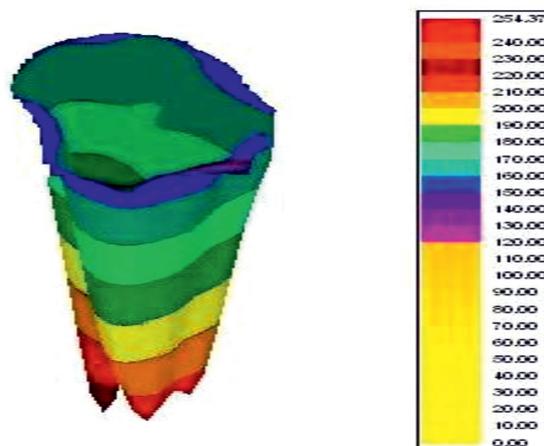


Рис. 3. 3D модель солнечного пятна

Вейвлеты [5] можно охарактеризовать следующими образами: временными и частотными. Временной образ – некоторая  $\psi(t)$  функция времени, а частотный образ – Фурье-образ  $\hat{\psi}(t) = F(t)$ , который задает огибающую вейвлет-спектра. Фурье-образ можно представить следующим выражением:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\psi}(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Рассмотрим вейвлет в пространстве: при его сужении «средняя» частота повышается, что приводит к перемещению спектра в области с более высокими частотами, т.е. к его расширению. Такие процессы можно отнести к линейным.

Вейвлет-преобразование и Фурье-преобразование отличаются в следующем: каждому вейвлету соответствует свое преобразование, т.е. оно определено неоднозначно.

Если  $\omega = 0$ , то Фурье-образ  $\hat{\psi}(t)$  вейвлета равняется 0.

При прямом вейвлет-преобразовании происходит разложение произвольного входного сигнала на новый базис в виде совокупности так называемых волновых пакетов.

Получается, что вейвлет-спектрограммы становятся наиболее пригодными для анализа тонкой структуры сигналов, содержащих ярко выраженные скачки, всплески и переходы производных через ноль и так далее. К таким сигналам можно отнести: звуковые сигналы речи и музыки, а также сигналы изображений. Все это мы учитывали при составлении программы в математическом пакете Matlab.

Нами были обработаны более 60 пятен, наблюдавшихся на Солнце в разное время. Также был проведен вейвлет-анализ для длин изолинии пятна, площади и объема. На рис. 4–6 представлены некоторые результаты нашего исследования.

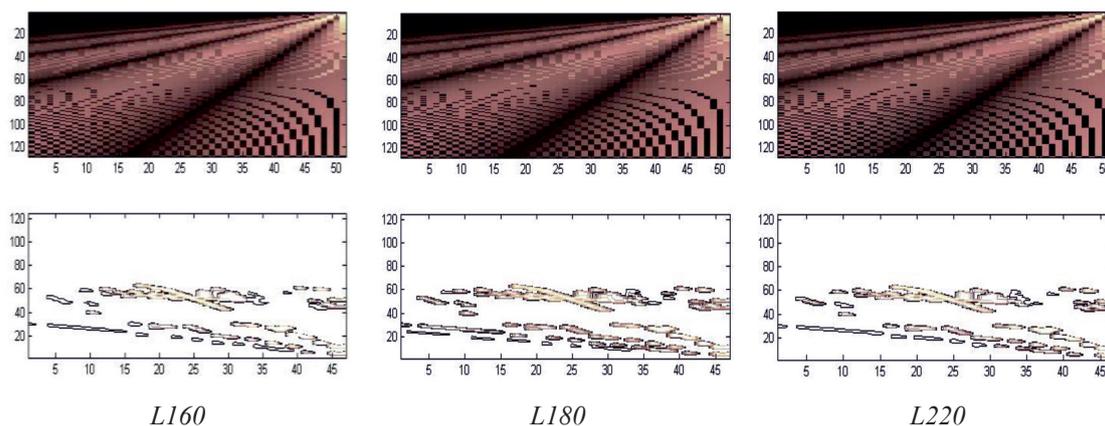


Рис. 4. Вейвлет и скейлограмма для периметра изолинии пятна

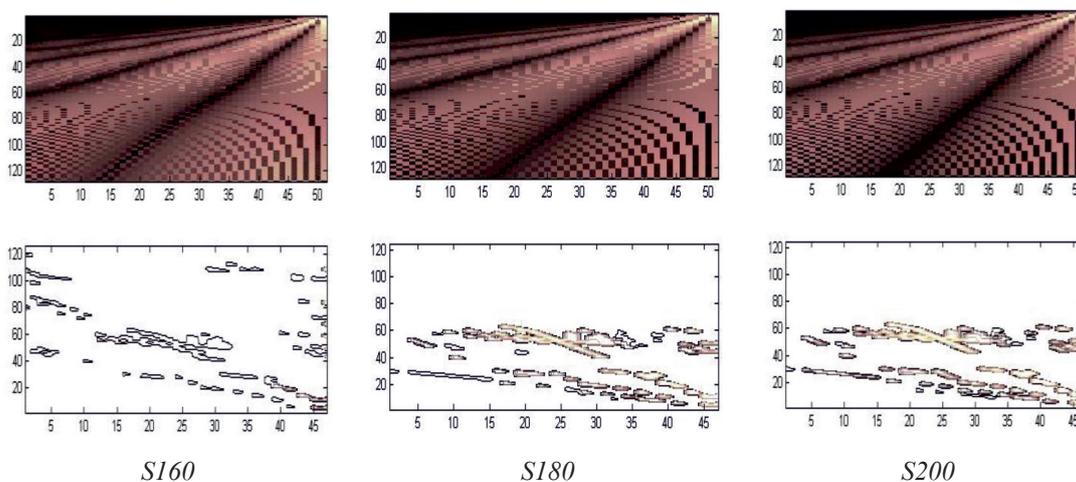


Рис. 5. Вейвлет и скейлограмма для площади пятна

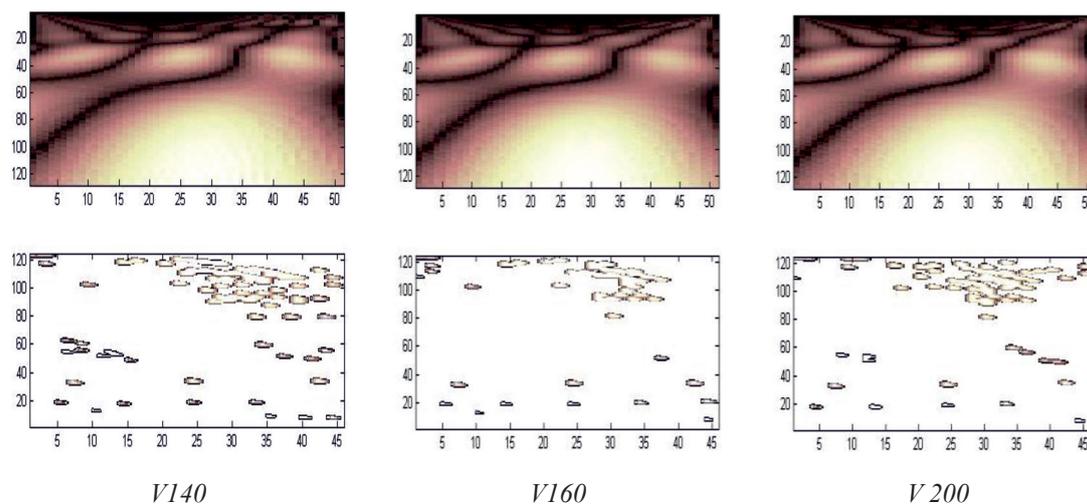


Рис. 6. Вейвлет и скейлограмма для объема пятна

### Выводы

В данной статье проведена визуализация информации, полученной в результате наблюдений солнечных пятен, которые являются активными образованиями. Получены трехмерные модели солнечных пятен, данные модели показывают зависимость пятна от глубины и изменения температуры с глубиной. Все это выполнялось с помощью программы 3DField Pro.

Также мы провели вейвлет-анализ временных рядов, составлена программа в математическом пакете Matlab для выявления периодических составляющих сигнала.

### Список литературы

1. Dzhimbeeva L.N. Quasiperiodic oscillations in the active solar regions from the data of nobeyama radioheliograph. *Solar System Research*. 2011. V. 45. № 1. P. 84–91.
2. Nagovitsyn Y.A., Nagovitsyna E.Y. Quasiperiodic sunspot oscillations on timescales from tens to hundreds of minutes: Groundbased optical observations (A review). *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017. V. 57. № 8. P. 921–939.
3. Strekalova P.V., Nagovitsyn Y.A., Smirnova V.V., Riehkainen A. Long-period variations in the magnetic field of small-scale solar structures. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. V. 56. № 8. P. 1052–1059.
4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений: практические советы. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
5. Кравченко В.Ф. Цифровая обработка сигналов атомарными функциями и вейвлетами. М.: Техносфера, 2018. 182 с.