

УДК 524.726

ГАЛАКТИКИ С «ВЕРЕНИЦАМИ»: НОВЫЙ КАТАЛОГ

© 2017 М. А. Бутенко*, А. В. Хоперсков**

Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062 Россия

Поступила в редакцию 7 ноября 2017 года; принята в печать 14 июня 2017 года

Среди многообразия спиральных галактических узоров выделяются галактики с «вереницами» по терминологии Воронцова-Вельяминова. Характерной особенностью таких объектов является наличие последовательности прямых отрезков, образующих спиральный рукав. В 2001 году А. Д. Чернин с соавторами опубликовали каталог таких галактик, включающий 204 объекта из Паломарского атласа. В данной работе мы дополнили указанный каталог 276 объектами, основываясь на анализе всех галактик из New General Catalogue и Index Catalogue. С учетом объектов из каталога Чернина и др. полное число галактик с «вереницами», входящих в NGC и IC, составило 406. Использование более новых изображений галактик позволило нам обнаружить в среднем больше «верениц» по сравнению с вышеозначенным каталогом. При сравнении важнейших характеристик галактик с «вереницами» и всех S-галактик из NGC/IC не удалось обнаружить сколько-нибудь существенных различий в этих выборках. Обсуждаются два механизма формирования полигональных структур, основанных на численных газодинамических и бесстолкновительных N-body расчетах, указывающих на то, что спиральный узор с «вереницами» является транзитной стадией эволюции галактик, через которую может проходить галактика с мощной спиральной структурой. Предположение Чернина с соавторами, что среди галактик с «вереницами» взаимодействующие галактики встречаются в два раза чаще, не подтверждается для объединенной выборки, состоящей из 480 галактик. Наличие центрального бара, по-видимому, является благоприятным фактором для образования системы «верениц».

Ключевые слова: *galaxies: spiral—galaxies: statistics—galaxies: structure*

1. ВВЕДЕНИЕ

Прямые сегменты, образующие спиральный узор галактик, можно выделить на изображениях некоторых спиральных галактик. На такую особенность, по-видимому, первым обратил внимание Воронцов-Вельяминов [1], назвав эти сегменты «вереницами» (rows). Такие довольно длинные практически прямые участки образуют у некоторых галактик неровные, но почти регулярные спиральные рукава, и эти структуры также часто называют полигональными рукавами [2]. Типичными примерами являются M101 и M51. А. Д. Чернин с соавторами составили каталог галактик с «вереницами», включающий 204 объекта [3, 4]. Анализ таких структур позволил определить их следующие свойства [3]:

1. Длина прямолинейного отрезка L («вереницы») линейно возрастает с увеличением расстояния d от центра галактики $d = (1.00 \pm 0.11)L$.
2. Угол между двумя соседними сегментами близок к $\alpha = 120^\circ$ (при стандартном отклонении 10°).

3. Прямые сегменты можно разделить на два типа: те, что образуют достаточно правильную глобальную структуру спирального рукава, и 1–2 сегмента, не образующие глобальный спиральный узор.
4. «Вереницы» наблюдаются преимущественно в галактиках поздних морфологических типов Sbc–Scd.
5. Прямые сегменты чаще наблюдаются во взаимодействующих галактиках.
6. Среднее число «верениц» в галактике $N = 3$.
7. Галактики с «вереницами» являются довольно редкими объектами, на их долю приходится около 7% всех спиральных галактик с хорошо определяемыми спиральными рукавами.

Заметим, что эти результаты основаны на изучении фотопластинок и изображений в Паломарском атласе.

В данной работе приведены результаты исследования построенного нами каталога галактик с полигональными структурами, который включает в себя 276 объектов, не вошедших в опубликованный ранее каталог [3]. Рассматриваемые вместе, эти ка-

*E-mail: maria_butenko@volsu.ru

**E-mail: khoperskov@volsu.ru

талогии покрывают все галактики с «вереницами», входящие в каталоги NGC и IC.

2. ВЫБОРКА ГАЛАКТИК С «ВЕРЕНИЦАМИ»

2.1. Общая характеристика

При поиске галактик с «вереницами» (со спрямленными участками ветвей) было просмотрено свыше 30 000 изображений спиральных галактик в различных диапазонах из астрономических баз данных, которые включают все спиральные галактики каталогов NGC/IC. Дополнительно к каталогу Чернина и др. [3], который содержит 204 галактики с «вереницами», наш анализ позволил выявить еще 276 спиральных галактик со спрямленными сегментами. При отборе объектов мы накладывали дополнительные ограничения: $\delta > -45^\circ$, ярче 15^m , угол наклона галактики к лучу зрения $i < 70^\circ$, объекты ближе 200 Мпк, $R_{25} \lesssim 30$ кпк. Мы использовали при построении выборки изображения из всех доступных источников, включая DSS, SDSS, GALEX, 2MASS, HST. Примеры некоторых галактик с «вереницами» приведены на рис. 1. Выделены также так называемые гексагональные структуры [2, 5], образующие в галактическом диске почти кольцо (NGC 4736, NGC 5351, NGC 6962, NGC 7329, IC 1764, IC 4688).

У некоторых объектов полигоны можно выявить в разных спектральных диапазонах, однако встречаются исключения. Полигональные структуры по данным 2MASS удалось обнаружить только у NGC 4254, NGC 5156, NGC 5351, NGC 5653, NGC 5968, NGC 6035, NGC 6691, NGC 7678, IC 1142, IC 2627, IC 4219, IC 4359, IC 4444, IC 4567, IC 4646, IC 4836, IC 4839 и IC 5325.

Первичный отбор объектов для нашей выборки проведен при просмотре изображений галактик из астрономических баз данных. Затем изображения таких галактик прошли процедуру обработки, подробно описанную в работе [6]. Изображение галактики с вереницами приводилось к виду «плашмя» ($i \approx 0$) поворотом до совмещения большой оси с одной из координатных осей и последующим растяжением вдоль малой оси в предположении бесконечно тонкого диска, затем на полученное изображение галактики наносились линии, выделяющие геометрию «верениц». После этого для каждой галактики были определены: длина i -ой «вереницы» L_i , расстояние от центра галактики до края «вереницы» d_i и угол между смежными спрямленными участками α_i .

Чтобы оценить погрешность такого метода, мы провели серии имитационного моделирования, фотографируя схематичные изображения различных

полигональных структур под различными углами i и приводя такие изображения к виду «плашмя». Для фиксированного угла i погрешности определения L и α сильно зависят от геометрии полигональной структуры и расположения конкретной «вереницы» в плоскости, перпендикулярной лучу зрения. В зависимости от положения «верениц» ошибка определения L и α лежит в пределах $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$. Результаты нашего имитационного моделирования дают $\varepsilon_{\max}^{(L)} = 12\%$ и $\varepsilon_{\max}^{(\alpha)} = 6\%$ для $i = 60^\circ$, уменьшаясь до $\varepsilon_{\max}^{(L)} = 9\%$ и $\varepsilon_{\max}^{(\alpha)} = 3\%$ при $i = 30^\circ$. Для случайного расположения «вереницы» ошибка определения ее параметров составляет порядка $\varepsilon_{\max}/2$. Усредненное по всем экспериментам и по всем «вереницам» значение погрешности не превышает 5% для линейных измерений. Для углов такое же усреднение дает $\delta\alpha \approx 3\%$. Таким образом, погрешности определения линейных и угловых величин при использовании описанного подхода не превышают ошибок в исходных данных наблюдений и при визуальном выделении «верениц» на изображениях.

В результате в дополнение каталога Чернина и др. [3] мы выявили 276 объектов, характеристики которых приведены в таблице 1: (1) обозначение галактики по каталогам NGC и IC, (2) морфологический тип галактики, (3) интегральная звездная величина B_0 , исправленная за межзвездное поглощение света в Галактике и за наклон галактики к лучу зрения, (4) гелиоцентрическая лучевая скорость V_0 , (5) абсолютная величина галактики M_B (для $H_0 = 75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$), (6) отношение массы нейтрального водорода к светимости галактики M_{HI}/L_B (в солнечных единицах), (7) число обнаруженных «верениц» в данной галактике, (8) источник основного изображения галактики, на котором были выделены спрямленные участки спиральной структуры для подсчета их количества, измерений линейных размеров и углов между «вереницами», (9) источники изображений, на которых можно также выделить спрямленные «вереницы», (10) указание на проявление у галактики признаков взаимодействия. Значения параметров в столбцах (2)–(6) таблицы 1 взяты из HyperLeda.¹

Отметим, что в отличие от выборки, построенной в работе [3], из 276 отобранных нами галактик только двенадцать упоминаются в каталоге взаимодействующих галактик Воронцова-Вельяминова (VV). Еще несколько имеют характерную возмущенную структуру спирального узора или признаки сильных взаимодействий, произошедших в прошлом (например, NGC 0060,

¹ См. [7] и <http://leda.univ-lyon1.fr/>

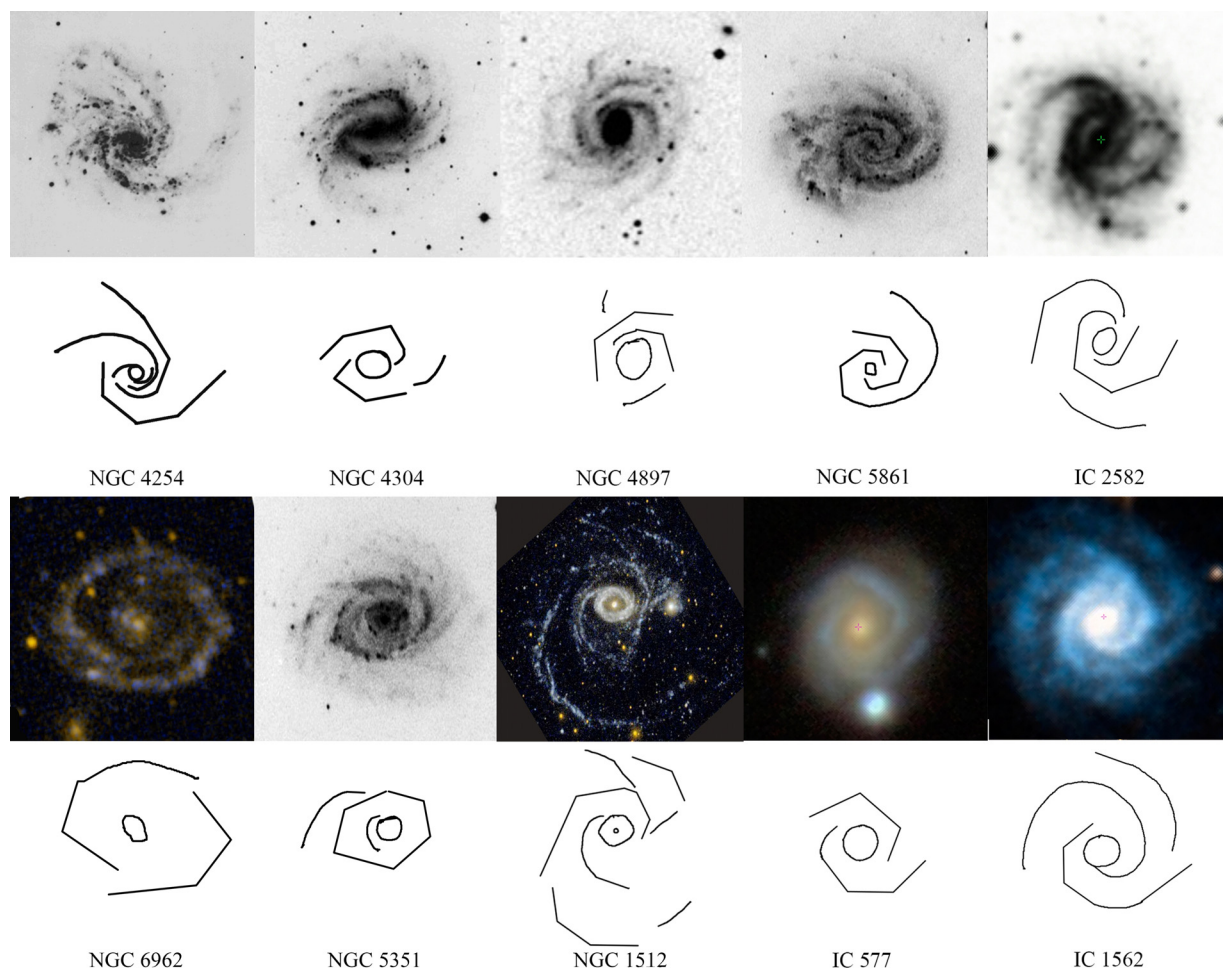


Рис. 1. Примеры галактик с «вереницами», образующими различные геометрические структуры.

NGC 1068, NGC 2442, NGC 5774, IC 1142, IC 2956 и IC 4441, IC 4567). Помимо VV-каталога при проведении анализа для нашей выборки мы использовали каталог пекулярных галактик (ARP), оценки приливного индекса для галактик местной группы [8, 9], а также информацию из базы HyperLeda, а именно параметр *multiple*,

принимающий значение M , если объект входит в группу. Небольшая доля взаимодействующих галактик в нашей выборке, возможно, обусловлена тем, что объекты с наиболее ярко выраженными признаками взаимодействия уже вошли в каталог А. Д. Чернина и др. [3].

Таблица 1. Галактики с «вереницами»

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
0010	Sbc	12.74	6803	-22.18	0.18	5	B	C, R	asym
0060	Sc	14.66	11809	-21.52		5	SD	B	
0099	Sc	13.71	5310	-20.74	0.86	3	B	SD	
0157	SABb	10.40	1654	-21.41	0.17	4	SD	B	
0165	Sbc	13.50	5889	-21.13	0.29	5	G	B	

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
0191	SABc	13.75	6076	-20.96		4	SD	B	ARP 127
0201	Sc	13.35	4386	-20.66	0.25	4	SD	B	M
0214	SABc	12.49	4535	-21.65	0.14	5	HST	SD, B	
0234	SABc	12.91	4449	-21.16	0.21	9	SD	C, B	
0255	Sbc	12.21	1597	-19.55	0.73	3	B	C	
0268	Sbc	13.00	5479	-21.49	0.46	2	SD	B	
0289	SBbc	11.39	1630	-20.25	1.16	2	G	B	VV 484, M, Grp
0300	Scd	8.40	165	-18.14	1.59	6	G	B	
0521	Sbc	12.40	5023	-21.90	0.15	6	SD	B, C	
0578	Sc	11.11	1628	-20.59	0.33	3	B	C	
0685	Sc	11.58	1360	-19.45	0.63	1	B	C, R	
0753	SABc	12.32	4902	-21.99	0.30	7	B	C	
0783	Sc	12.43	5192	-22.01	0.14	4	G	SD, B, C	
0799	SBa	13.96	5837	-20.66	0.31	2	SD	B, C	
0800	Sc	14.03	5934	-20.63	0.38	2	SD	B	
0877	SABc	11.83	3913	-21.95	0.30	5	B	G, C	
0887	SABc	13.02	4311	-20.88	0.44	1	B	G, C, R	
0895	Sc	11.88	2288	-20.67	0.50	5	SD	G, B, C	
0925	Scd	9.78	554	-20.17	0.25	5	B	G, C	
0977	Sa	13.85	4611	-20.22	0.43	4	B	G, C	
0986	Sab	11.44	1984	-20.62	0.09	2	B	G, C	
1068	Sb	9.53	1138	-21.50	0.04	4	G	B	ARP 037, Grp
1073	SBc	11.16	1208	-20.02	0.37	2	B	SD, C	
1187	Sc	11.03	1391	-20.22	0.33	4	B	G, C, R	Grp
1300	Sbc	10.60	1578	-20.97	0.15	7	B	G, C, R	
1365	Sb	9.83	1638	-21.75	0.27	8	G	B	VV 825
1385	Sc	11.01	1497	-20.45	0.17	3	B	G	
1512	Sa	10.75	898	-19.20	0.82	8	G		Grp
1566	SABb	9.98	1502	-21.27	0.32	6	G	B	
1667	SABc	12.22	4567	-21.83	0.09	2	SD	B	
1832	Sbc	10.66	1938	-21.41	0.15	2	B	C	
2336	Sbc	10.63	2202	-22.14	0.17	6	B	G	

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
2442	Sbc	10.27	1458	-20.91	0.32	5	B	C	Гр
2460	Sab	12.14	1442	-19.78	0.46	3	B		
2528	SABb	13.35	3918	-20.50	0.14	3	SD	B	
2532	SABc	12.65	5248	-21.80	0.29	5	SD	B	
2771	Sab	13.70	5097	-20.74	0.79	7	SD	G, B	
2861	SBbc	13.60	5076	-20.74	0.17	4	SD	B, C	
2989	SABb	12.99	4143	-20.86	0.43	7	HST	B	
3261	Sbc	11.35	2564	-21.34	0.35	6	B	C	
3319	SBc	11.15	742	-19.54	0.24	4	SD	B, C	
3359	Sc	10.75	1013	-20.57	0.36	5	B	G, SD	
3408	Sc	14.07	9507	-21.70		3	SD	B, C, R	
3507	SBb	11.86	975	-19.09	0.18	5	SD	B, C	
3513	SBc	11.09	1198	-19.94	0.14	6	B	G, C	
3601	SBab	13.69	8119	-21.68	0.17	4	SD		
3686	SBbc	11.69	1157	-19.63	0.11	5	B	SD, G	
3719	Sbc	13.27	5863	-21.40	0.34	8	SD	B	
3726	Sc	10.31	864	-20.72	0.12	5	B	SD, G, C	
3893	SABc	10.26	962	-21.00	0.10	3	B	SD, G, C	М
3978	SABb	13.14	9950	-22.73	0.14	2	SD	B	
3992	Sbc	10.08	1047	-21.31	0.09	2	B	SD	
4029	SABb	14.02	6197	-20.77	0.21	2	B	SD	
4030	Sbc	10.86	1463	-20.84	0.20	5	SD	G, B	
4035	SABb	13.73	1569	-18.03	0.84	4	B		
4079	SABb	13.27	6086	-21.47	0.21	8	SD	B	
4123	Sc	11.60	1327	-19.91	0.38	2	B	SD, C	
4136	Sc	11.92	590	-18.38	0.27	2	B	SD, C	
4141	SBc	14.35	1900	-18.16	0.71	2	SD	B, C, G	
4145	Scd	11.06	1011	-20.19	0.19	2	B	SD, G	
4151	SABa	11.09	988	-20.16	0.15	2	B		
4156	Sb	13.71	6755	-21.32	1.22	4	SD	B	
4210	Sb	13.20	2713	-19.99	0.14	4	SD	B, C	
4254	Sc	10.18	2408	-22.62	0.19	6	B	SD, G, 2M	

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
4304	Sbc	12.14	2623	-20.66	0.45	5	B	C	VV 018, M
4319	SBab	12.21	1443	-19.81		1	B		
4444	SABb	12.51	2915	-20.50	0.48	4	C	B	
4450	Sab	10.48	1955	-21.90	0.01	4	G	SD, B	
4475	SBbc	14.01	7388	-21.20	0.32	7	SD	B	
4487	Sc	11.27	1036	-19.67	0.21	2	C	SD, B	
4499	SBbc	13.24	3353	-20.09		3	B	C	
4536	SABb	10.32	1807	-21.85	0.18	7	G	B	
4579	SABb	10.12	1517	-21.74	0.02	3	B	SD	
4603	SABc	11.46	2590	-21.27	0.25	4	B	C	
4622	Sa	13.22	4468	-20.77		6	B	C	
4653	SABc	12.61	2624	-20.33	0.46	5	B	SD, C	
4682	SABc	12.35	2322	-20.27	0.19	5	B	SD, C	
4701	Sc	12.45	723	-17.84	0.67	2	SD	B, C	
4734	Sc	13.90	7525	-21.32	0.32	2	SD	B, C	
4736	Sab	8.54	314	-20.98	0.01	6	G	SD	
4897	Sbc	12.87	2558	-19.97	0.87	5	B	G, C	
4902	Sb	11.51	2631	-21.40	0.21	7	B	G, C	
4947	Sb	11.97	2405	-20.65	0.18	6	B	C	
4965	SABc	12.23	2264	-20.27	0.30	8	B	C	
4981	Sbc	11.65	1678	-20.31	0.27	4	B	G	
5020	SABb	12.94	3362	-20.57	0.68	5	SD	G, B	
5033	Sc	10.08	876	-20.95	0.19	4	B	SD, G, C	
5101	S0-a	11.22	1858	-20.84	0.12	4	B		
5112	SBc	12.21	972	-19.04	0.39	2	SD	G, B, C	
5156	SBb	11.74	2986	-21.33	0.22	6	B	2M	
5213	Sb	14.48	6884	-20.55	0.41	2	SD	B, C, R	
5227	Sb	13.60	5235	-20.84	0.41	5	SD	B, C	
5327	Sb	13.15	4354	-20.89	0.33	4	SD	B	
5334	Sc	12.52	1380	-19.12	0.46	3	B	SD, G, C	
5345	Sa	13.34	7255	-21.79	0.10	3	SD	B	
5351	SBb	12.57	3613	-21.16	0.38	6	B	SD, C, 2M	asym

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
5395	SABb	11.72	3468	-21.92	0.28	5	B	SD, G	VV 048, ARP 084, M
5494	Sc	12.91	2619	-19.93	0.61	6	B	G,	
5584	SABc	12.33	1648	-19.69	0.43	3	B	SD	
5618	SBC	13.40	7140	-21.71	0.34	3	SD	B, C	
5643	Sc	9.95	1190	-21.00	0.10	5	B	C	
5653	Sb	12.69	3564	-20.99	0.12	6	HST	SD, 2M	
5655		16.71				4	B	SD	
5669	SABc	12.41	1373	-19.28	0.57	3	SD	B, C	
5674	SABc	13.06	7473	-22.16	0.15	3	B	SD, C	
5754	SBb	13.74	4404	-20.41	0.32	11	SD	B	ARP 297, M M
5774	SABc	12.54	1566	-19.37	0.61	1	SD	B, G	
5786	Sbc		2981			3	B	C	
5850	Sb	11.40	2547	-21.50	0.07	8	G	SD, B	
5861	SABc	11.19	1859	-21.02	0.18	8	B	C	
5905	Sb	12.98	3391	-20.66	1.07	6	SD	G, B, C, R	
5968	SABb	12.50	5460	-21.97	0.21	10	B	C, 2M	
6001	Sc	14.07	9974	-21.79	0.44	5	SD	B, C	
6008	Sb	13.72	4861	-20.60	0.45	4	SD	B, C	
6035	Sc	13.73	4756	-20.55	0.24	4	SD	B, C, 2M	ARP 185
6217	Sbc	11.46	1368	-20.45	0.27	5	SD	G, B, C	
6221	Sc	9.69	1485	-21.70	0.21	4	B	C	
6267	Sc	13.29	2980	-20.04	0.23	3	B	B, C	
6384	SABb	10.55	1664	-21.51	0.19	4	B	SD, C	
6484	Sb	12.73	3114	-20.68	0.66	3	B	SD, C	
6691	Sbc	13.27	5883	-21.50	0.20	2	B	C, 2M	
6699	SABb	12.39	3391	-20.94	0.07	7	B	C	
6744	Sbc	8.61	851	-21.33	1.09	8	G	B, C	Grp, UNGC
6753	Sb	11.51	3176	-21.68	0.17	4	B	G, C	
6769	SABb	12.10	3813	-21.49		6	B	C	VV 304, M
6770	Sb	12.24	3842	-21.37	0.33	3	B	G, C	VV 304, M
6780	SABc	12.90	3493	-20.51	0.25	2	B	C	
6782	Sa	12.18	3923	-21.48	0.11	6	G	B	

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
6845	SBbc	13.19	6679	-21.69		3	B		
6878	SABb	13.20	5853	-21.40		6	B	C	
6919	SABc	13.26	6727	-21.65		2	C	B, C	
6923	SBb	11.89	2831	-21.11	0.46	4	B	C	
6935	SABa	12.56	4589	-21.48		4	G	C	
6941	Sb	13.48	6219	-21.32	0.43	2	C	SD, B	
6943	Sc	11.45	3116	-21.65	0.43	6	C	G, B	
6949	Sc	12.76	2763	-20.48	0.33	5	C	B	
6951	SABb	10.05	1425	-21.92	0.04	4	C	B	
6955	SABb	14.35	8168	-21.05		5	SD	B, C	
6962	SABa	12.37	4202	-21.58	0.33	5	G	SD, B, R	M
6976	SABb	14.35	5998	-20.36		6	SD	B	
6984	Sc	12.66	4663	-21.42	0.40	6	C	B	
7038	SABc	11.94	4932	-22.25	0.34	8	B	C	
7059	SABc	11.56	1734	-20.19	0.70	2	C	B	
7065A	SABc	14.46	7404	-20.70		3	SD	B	
7070	Sc	12.54	2397	-20.00	0.82	4	B	C	
7083	SBbc	11.30	3106	-21.80	0.36	7	B	C	
7102	Sb	13.47	4846	-20.79	0.41	4	B	C	
7125	SABc	12.31	3078	-20.79	1.68	10	B	C	
7171	SBb	12.43	2717	-20.55	0.41	3	B	C	
7221	Sbc	12.41	4356	-21.54	0.30	3	C	B, G	
7252	S0	12.59	4724	-21.54	0.04	5	HST		ARP 226, M
7257	SABb	12.95	4902	-21.31	0.20	4	SD	B, C	
7309	SABc	12.70	4006	-21.10	0.19	5	B	C	
7323	Sb	13.62	5601	-20.98	0.35	2	SD		M
7329	SBbc	12.04	3251	-21.15	0.46	6	C	B, G	
7412	SBb	11.51	1710	-20.25	0.25	4	C	B, G	
7418	Sc	11.42	1447	-19.97	0.27	5	B	C, B	
7421	Sbc	12.41	1801	-19.51	0.15	5	B	C, G	
7424	Sc	10.52	937	-19.78	0.85	5	B	C, G	
7535	Scd	13.95	4604	-20.20	0.65	2	SD	B, C	

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
7678	Sc	12.04	3488	-21.55	0.16	6	B	C, G, SD, 2M	VV 359, ARP 028
7691	Sbc	13.58	4038	-20.31	0.36	4	SD		
7713A	Sc	12.88	3008	-20.19	0.27	5	C	B	
7714	Sb	12.53	2797	-20.51	0.42	2	SD	B, C	VV 051, ARP 284, M
IC									
0004	Sc	13.69	5011	-20.65	0.17	2	SD	B	ARP 031
0167	Sc	12.92	2934	-19.39	0.35	4	G	SD	
0173	SBbc	14.57	13965	-21.99	0.24	6	SD	B	
0209	SBbc	13.35	3964	-20.41	0.17	2	SD		
0221	Sc	13.13	5088	-21.25	0.46	4	C	B	
0342	SABc	6.14	25	-21.54	0.47	7	B	C, R	
0370	Sc	14.39	9727	-21.34	0.52	4	B	C	
0382	SABc	12.74	4998	-21.5	0.53	4	B	C, G	
0438	SABc	12.43	3123	-20.56	0.58	4	C	B, G	
0492	SBbc	13.9	5148	-20.51	0.35	5	SD		VV 526
0498	Sb	14.27	10139	-21.59	0.38	2	SD		
0503	Sa	14	4125	-19.87	1.39	3	SD		
0509	SABc	13.56	5490	-20.98	0.45	5	B	SD	
0512	SABc	12.7	1614	-19.5	0.40	6	G	B	
0527	SBC	14.43	6868	-20.61	0.86	7	SD	B	
0539	Sc	13.97	7043	-21.07	0.29	5	SD	B	
0577	Sc	14.65	9014	-20.95	0.33	6	SD	B	
0616	Sc	14.27	5776	-20.38	0.42	5	SD	B	
0651	SBd	12.9	4491	-21.17	0.28	3	SD		ARP 117
0900	SABc	13.3	7066	-21.8	0.35	4	SD	C, B	
0983	SBbc	12.49	5442	-22.06	0.67	5	SD	C, B	
0992	SABb	14.46	7782	-20.84	0.64	2	SD	B	
1093	SABb	14.5	13370	-21.99	0.47	4	SD	B, G	
1132	Sc	14.07	4524	-20.1	0.65	5	SD	C, B	
1142	SBC	14.51	13973	-22.09	0.70	4	SD	C, B, 2M	M
1149	Sbc	13.76	4681	-20.47	0.41	4	SD	C, B	M
1236	Sc	13.79	6026	-20.99	0.29	3	SD	C, B	VV 442, M

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1269	Sbc	12.7	6115	-22.11	0.26	6	B	C	VV 538, M asym
1301	Sc	14.1	3990	-19.86	1.36	3	C	B	
1377	SBab	14.22	9039	-21.4		5	SD		
1516	Sbc	13.83	7278	-21.29	1.08	7	SD	B	
1525	Sb	12.52	5010	-21.89	0.31	5	B	C	
1543	Sbc	13.94	5595	-20.65	0.36	2	SD	B	
1562	SBc	13.46	3728	-20.12	0.65	4	C	B	
1607	Sc	14.14	5438	-20.34	0.66	3	SD		
1666	Sc	14.1	4881	-20.2	0.38	2	B	SD	
1734	Sc	13.29	4924	-20.9	0.34	3	B		
1764	Sb	13.81	5066	-20.56	0.45	5	B	C	
1852	Sc	14	8428	-21.45		4	B		
1953	Sc	11.76	1864	-20.21	0.15	2	B		
2226	SABa	13.88	10876	-22.14	0.13	5	SD	B	
2473	Sbc	14.32	8070	-21.07	0.31	3	G		
2490	SABb	14.3	7333	-20.88	0.97	4	SD		
2522	Sc	12.44	3017	-20.32	0.61	2	B	G, C	
2537	Sc	12.11	2788	-20.65	0.34	4	B	G	
2548	SBbc	13.18	4409	-20.77	0.39	6	B	C	
2556	Scd	13.37	2505	-19.46	0.47	2	B	C	
2580	Sc	12.93	3140	-20.26	0.51	6	B	C, R	
2582	Sbc	13.32	4161	-20.5	0.21	7	B	C, R	
2604	SBm	14.5	1628	-17.57	1.75	1	SD	B, C, R	
2627	SABc	11.89	2088	-20.41	0.28	5	B	G, C, 2M	
2947	SBm	14.3	12705	-22.08	0.45	3	SD	B	
2956	Sbc	14.62	9056	-21.02	0.47	5	B	SD	
3062	Sc	14.32	7860	-21	0.31	5	SD	B	
3109	Sbc	14.46	12853	-21.93	0.37	4	SD	B	
3115	Sc	13.3	734	-18.64	0.37	6	B	G	VV 431, Grp
3156	SBcd	14.33	5874	-20.37	0.30	2	B	SD	
3253	Sc	11.62	2706	-20.65	0.24	3	B	C	
3267	Sc	13.99	1236	-18.87	0.20	5	SD	B	

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
3271	SABc	14.42	7211	-20.71	0.52	3	SD	B, C	М
3376	SBa	14.07	7130	-21.06	0.65	2	SD	B	
3407	SBb	14.14	7004	-20.95	0.31	3	B	SD	
3709	Sbc	14.68	14311	-21.95	0.61	4	SD	B	
3827	Sc	13.58	4303	-20.39	0.29	4	B		
3829	SABa	13.26	3564	-20.25	0.74	4	B	C	
3896A	Scd	11.88	2142	-20.42	0.13	1	B	C	
4219	SBb	13.18	3654	-20.38	0.14	2	B	2M	
4229	Sb	14.16	6953	-20.89	0.46	2	SD	B, C	
4237	SBb	12.48	2658	-19.87	0.24	4	B	C	
4248	Sc	13.51	4105	-20.31	0.74	4	B		
4270	Sbc	14.16	7964	-21.13	0.70	5	B	C	
4341	Sc	14.64	2344	-18.24	1.96	4	B	SD	
4359	Sc	13.16	4130	-20.64	0.54	3	B	C, 2M	
4366	Sc	12.75	4615	-21.32	0.31	5	B	C	
4367	SABc	12.54	4054	-21.24	0.23	6	B	C	Grp
4388	Sbc	13.79	4010	-19.99	0.59	3	B		
4397	Sbc	13.7	4381	-20.41	0.52	5	SD	B	
4441	Sc	13.65	4452	-20.34	0.45	2	B	C	
4444	SABb	11.2	1958	-20.91	0.13	5	B	2M	
4479	Sc	14.67	13593	-21.86	0.64	3	SD	B, C	
4538	SABc	12.13	2862	-20.94	0.12	5	B	C	
4567	Sc	13.24	5728	-21.31	0.21	4	SD	2M	
4585	SBb	12.05	3645	-21.46		6	B	C	
4633	Sc	12.14	2942	-20.44	0.56	6	B	C	
4641	Sc	13.7	5333	-20.64	0.16	7	B	C	
4646	Sc	11.83	3172	-21.36	0.53	6	B	C, 2M	
4661	Sc	12.95	4828	-21.16	0.61	5	B	C	М
4682	SBbc	12.38	3570	-21.05	0.47	4	B	C	
4688	Sc	13.71	6026	-21.05	0.21	3	B	SD	
4722	Sc	12.83	4817	-21.3		6	B		
4729	Sc	12.44	4434	-21.49	0.29	8	B	C	

Таблица 1. (Продолжение)

NGC/IC	Тип	B_0	V_0 , км с ⁻¹	M_B	M_{HI}/L_B	Число «верениц»	Основной источник*	Другие источники*	Взаимо- действие**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
4769	SBbc	13.26	4535	-20.73	0.60	5	B	C	M, Grp
4836	Sbc	12.82	4604	-21.21	1.07	5	B	G, 2M	
4839	Sbc	12.77	2717	-20.07	0.50	6	B	M	
4852	Sbc	12.84	4425	-21.09	0.36	5	B	C	
4857	Sc	12.94	4674	-21.13	0.38	3	B	C	
4876	SABc	13.7	5577	-20.78	0.63	5	B	C	
4901	SABc	11.44	2139	-20.11	0.37	9	B	C	
4933	SBbc	12.4	4910	-21.79	0.37	4	B	G	
4998	Sbc	13.42	6662	-21.48		4	B	C	
5005	Sbc	13.06	3094	-20.16	0.71	6	C	B	
5092	Sbc	12.74	3246	-20.48	0.42	9	B		
5116	SBbc	13.6	3791	-19.97	0.47	3	B	C	
5141	Sbc	13.09	4477	-20.86	0.64	4	B	C	
5188	SABc	13.47	4614	-20.55	0.47	5	B	C	
5261	Sbc	13.56	3238	-19.74	0.46	4	B	C	
5325	Sbc	11.71	1507	-19.75	0.12	8	C	G, 2M	

* Принятые сокращения: C — DSS colored; 2M — 2MASS;
 B — DSS2 Blue (XJ+S); G — GALEX;
 R — DSS2 Red (F+R); SD — SDSS DR9 color;
 HST — Hubble Space Telescope (оптический диапазон).

** Примечания: VV — упоминается в каталоге галактик Воронцова-Вельяминова под указанным номером;
 ARP — номер объекта в каталоге пекулярных галактик;
 M — принадлежит к паре или группе галактик, согласно данным HyperLeda;
 Grp — включен в каталог [8];
 UNGC — входит в состав каталога [9] и имеет большой приливной индекс ($\Theta \geq 2.0$);
 asym — объект ассиметричный, имеются достаточно выраженные признаки взаимодействия.

2.2. Статистические свойства

При рассмотрении вопроса о возможности объединения нашей выборки с каталогом [3] для выделения «верениц» мы использовали вместо паломарских снимков шести случайно выбранных объектов из [3] соответствующие изображения SDSS/DSS и получили заметные расхождения по числу «верениц» (таблица 2), за исключением NGC 1637. Наиболее значительна разница

в случае NGC 5921, что объясняется лучшим разрешением центральной области галактики на современных изображениях, чего не могли обеспечить снимки Паломарского атласа. Принимая во внимание этот результат, обусловленный большим различием качества исходных наблюдательных данных, мы считаем нецелесообразным объединять выборки для рассмотрения распределений по числу «верениц», по их линейным и угловым размерам.

Таблица 2. Число «верениц» у случайным образом выбранных галактик из каталога [3] по изображениям Паломарского атласа и SDSS/DSS

Галактика	Число «верениц» по оценкам [3]	Наша оценка числа «верениц»
NGC 0514	2	4
NGC 1637	3	3
NGC 5597	2	4
NGC 5921	3	8
NGC 7229	2	3
NGC 7755	4	5

Тем не менее, распределения по остальным характеристикам галактик с полигональными структурами из работы [3], демонстрируют хорошее согласие с приведенными в данной работе и будут показаны как по отдельности (для выборки из [3] с учетом современных значений в базе HyperLeda и нашей выборки), так и для объединенной выборки.

Сравним статистические свойства нашей выборки с результатами работы [3]. На рис. 2 приведены распределения по морфологическим типам. Для нашей выборки это распределение немного смещено в сторону галактик более ранних типов по сравнению с аналогичным распределением в работе [3]. На рис. 3а и 3б представлены распределения галактик двух каталогов по абсолютным звездным величинам. Величины объектов нашей выборки лежат в пределах от -17^m до $-22^m.5$ при среднем значении $M_B = 20^m.5$ как для всей выборки, так и для галактик с баром, что согласуется с результатами [3].

По данным HyperLeda 77% галактик из нашей выборки являются галактиками с баром. В каталоге [3] бар присутствует у 70% галактик, что дает для общей выборки всех 406 объектов с «вереницами», входящих в каталоги NGC/IC, 74% SB-галактик. Однако, для всех 7143 галактик, входящих в каталоги NGC/IC, бар в HyperLeda указан для 51% случаев. По-видимому, наличие бара является благоприятным условием для образования полигональных структур в спиральной волне плотности из-за более подходящих условий формирования сильных галактических ударных волн (УВ) в более мощном потенциале звездной волны плотности.

Число «верениц» N у галактик нашего каталога варьируется от 1 до 11 со средним значением

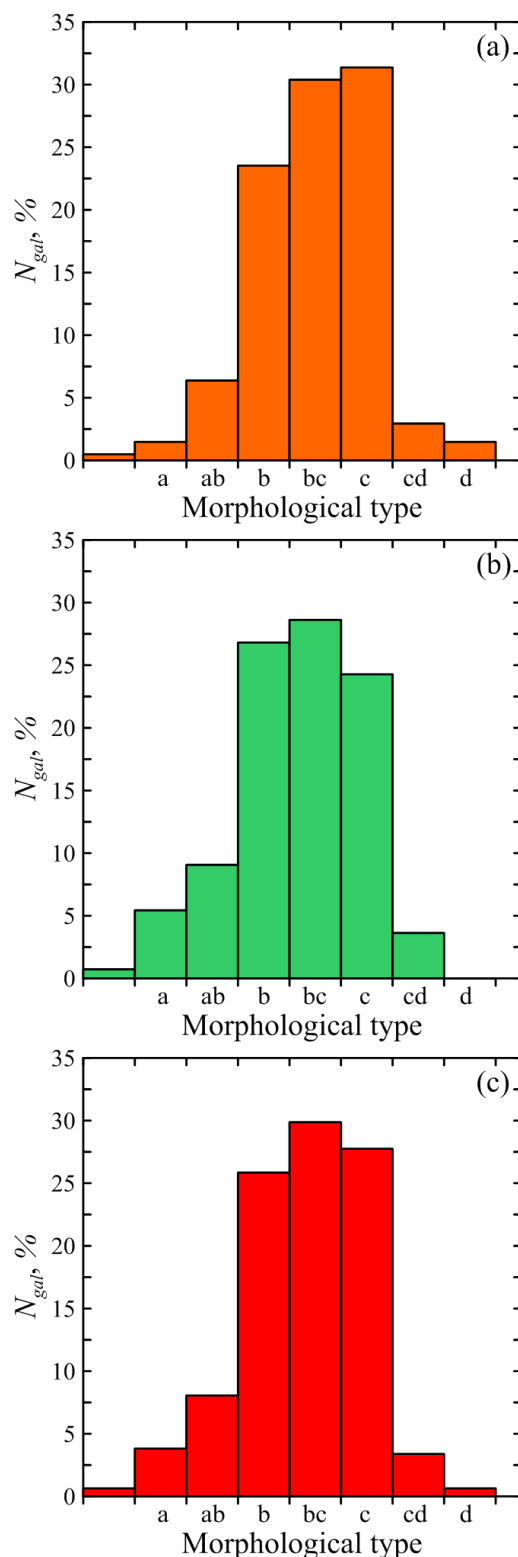


Рис. 2. Распределение галактик по морфологическим типам: (а) для выборки [3] данные перестроены с учетом данных из базы HyperLeda; (б) для нашей выборки галактик; (с) суммарная гистограмма для обеих выборок.

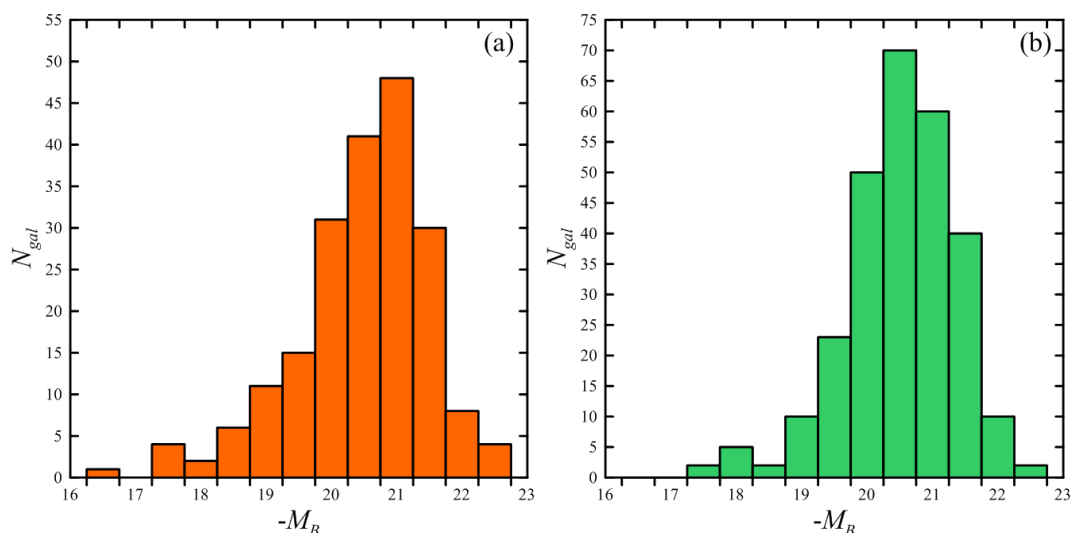


Рис. 3. Распределение галактик по абсолютным звездным величинам: (а) для всех галактик из выборки [3]; (б) для нашей выборки галактик.

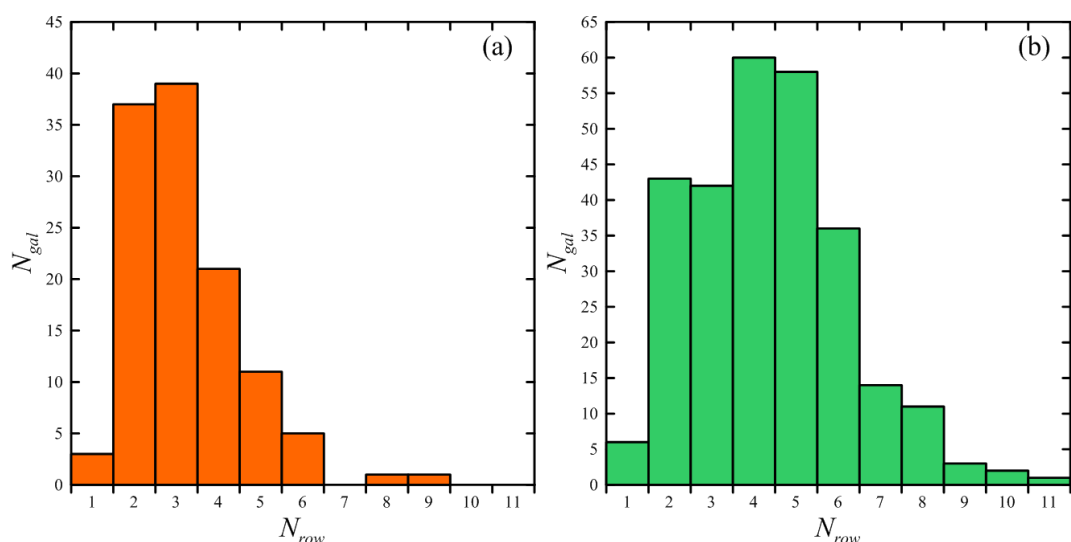


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но по числу «верениц».

$\langle N \rangle = 4$ (рис. 4). В случае каталога [3] среднее количество «верениц» для всей выборки близко к 3 и у большинства галактик выделено 2 или 3 «вереницы». Для нашей выборки распределение по числу «верениц» является довольно широким с менее ярко выраженным максимумом (см. рис. 4b). Как и в каталоге [3], корреляция числа «верениц» с абсолютной звездной величиной M_B не обнаружена.

Линейные размеры «верениц» L варьируются в широких пределах, причем в нескольких галактиках, например NGC 0010, NGC 1365, NGC 1512, NGC 3976, NGC 5850, NGC 6935, их длина превышает 22 кпк, а для IC 4479 достигает 30 кпк (рис. 5). Средняя длина «вереницы» $\langle L \rangle = 6.6$ кпк, а меди-

анное значение — 5.6 кпк. Эти результаты почти вдвое превышают значения для каталога [3], что обусловлено большей долей длинных «верениц» из-за выявления более протяженной спиральной структуры и увеличения длины L с расстоянием r за счет качественных изображений периферии галактик по данным SDSS и далеко за пределами оптического радиуса в случае GALEX.

Как и в случае каталога [3], имеется корреляция между длиной «вереницы» и расстоянием d от центра галактики до конца «вереницы»: чем дальше от центра, тем длиннее «вереницы» (рис. 6). Длина «вереницы» и расстояние от центра d нормированы на оптический радиус галактики $D_{25}/2$. Сплошной линией на рис. 6 показана зависимость $d = L$, а

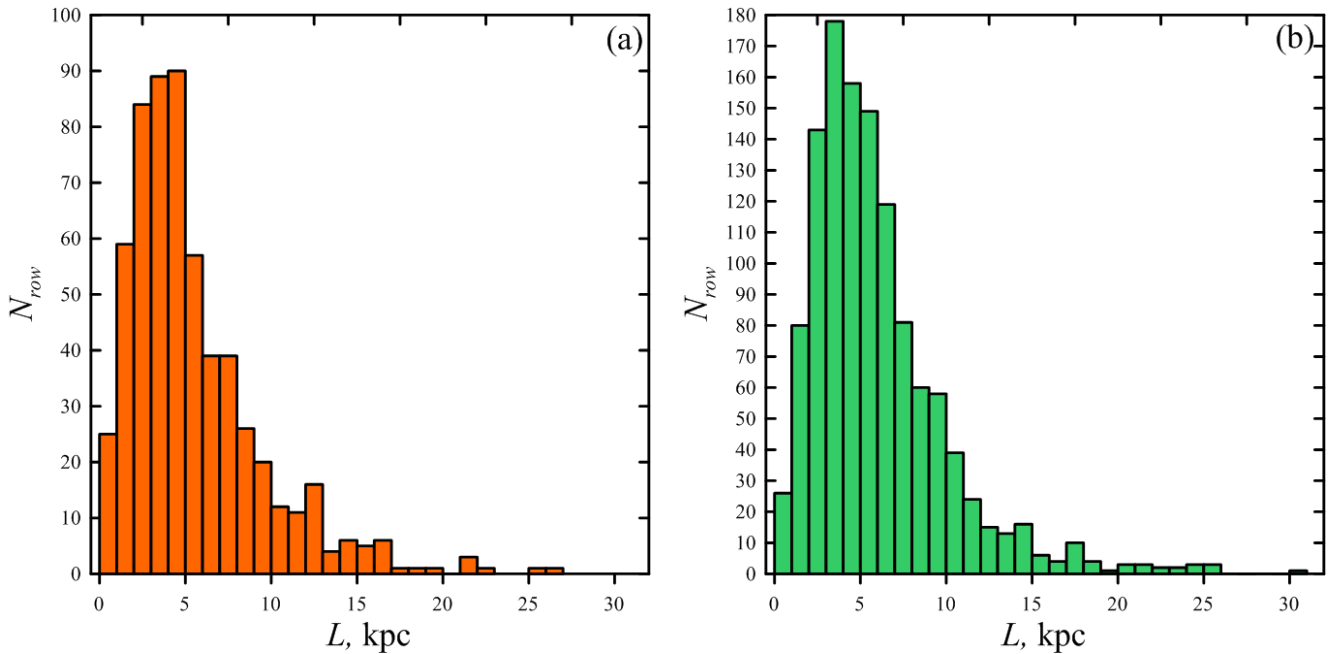


Рис. 5. Распределение «верениц» по линейным размерам: а) для всех галактик из выборки [3]; б) для нашей выборки галактик.

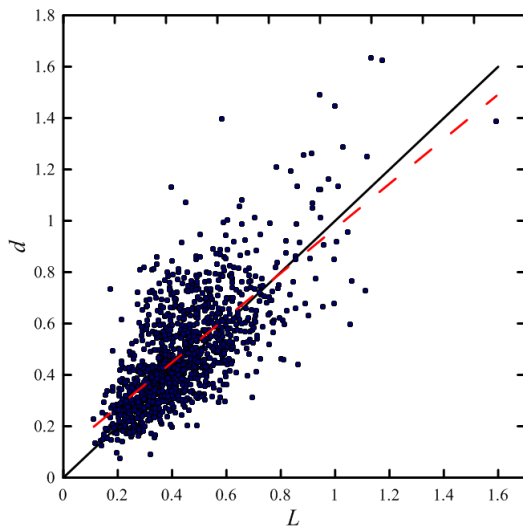


Рис. 6. Диаграмма «длина вереницы L — расстояние от центра d » (обе величины нормированы на оптический радиус галактики $D_{25}/2$). Пунктир — регрессионная линия, сплошная линия — зависимость $d = L$.

пунктиром — линейная аппроксимация этой зависимости, $d = 0.87L + 0.1$.

На рис. 7 приведены распределения галактик с «вереницами» (7а) и всех S-галактик из каталогов NGC и IC относительно величины угла наклона i по данным из HyperLeda. Для общей выборки по всему каталогу NGC/IC имеется большая доля объектов со значением угла $i \simeq 90^\circ$, что обусловлено эффектом увеличения поверхностной яркости

галактик, видимых с ребра, из-за геометрического фактора. Дополнительный вклад дает также присвоение в базе данных HyperLeda некоторым недисковым галактикам значений $i = 90^\circ$. Доля полигональных галактик с углом $i > 70^\circ$ мала из-за проблем определения свойств спирального узора и мы их исключаем из рассмотрения.

Рисунок 7 демонстрирует качественное сходство распределений галактик с «вереницами» и всех S-галактик в каталогах NGC и IC по углу i . В обоих случаях имеем колоколообразный вид распределений с максимумом в области 40° для галактик с «вереницами» и 50° для всех спиральных галактик из NGC. Неравномерность распределений обусловлена эффектами наблюдательной селекции и способом определения угла наклона в каталоге HyperLeda по отношению фотометрических осей $b:a$. Из-за наличия бара, балджа, различных искажений формы у взаимодействующих галактик и объектов поздних морфологических типов оценка по отношению осей очевидно приводит к систематическим отклонениям от равномерных распределений, как для галактик с малым углом i (face-on), так и для больших i (edge-on) [10].

В галактиках со значительным углом наклона сложно выявить спрямленные участки в спиральном узоре, поэтому, учитывая неполноту нашей выборки для углов $i \geq 55^\circ$ (см. рис. 7), далее мы приводим распределения как для полной выборки галактик с «вереницами», так и отдельно для галактик с $i < 55^\circ$.

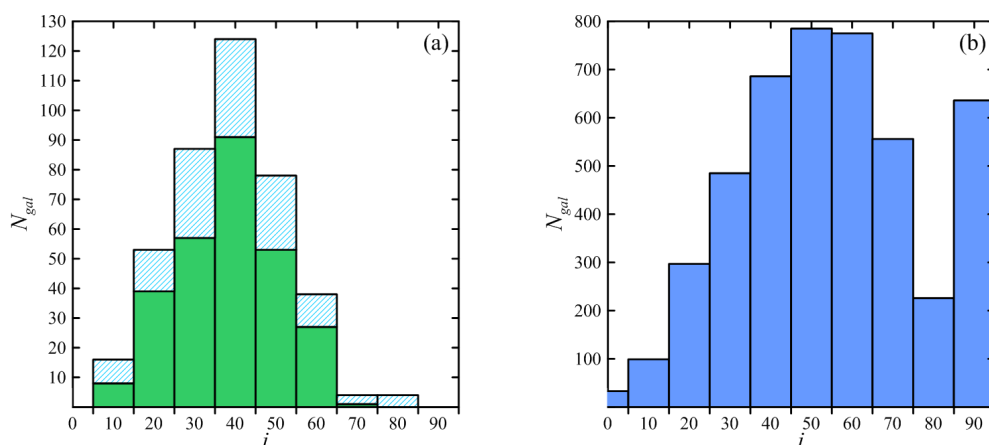


Рис. 7. Распределение спиральных галактик по углам наклона к лучу зрения i : (а) для галактик с «вереницами» из каталога NGC и IC (для 276 объектов из нашего каталога — закрашенные столбцы, для 406 объектов, включая NGC объекты из каталога [3] — заштрихованные столбцы); (б) для всех спиральных галактик из каталога NGC и IC (по данным HyperLeda).

Угол между соседними «вереницами», как правило, близок к $\alpha = 120^\circ$ (рис. 8). Среднее значение угла равно 126° , как для всей нашей выборки, так и для галактик с баром, что согласуется с результатами [3].

Оценки содержания газа в галактиках с «вереницами» представлены на рис. 9, где мы приводим распределения отношения M_{HI}/L_B (в солнечных единицах). Максимум приходится на 0.3 при среднем значении $\langle M_{\text{HI}}/L_B \rangle = 0.39$ для всей выборки, что не противоречит [3].

UBV-фотометрия с показателями цвета, исправленными за галактическое селективное поглощение и наклон диска галактики, есть по данным HyperLeda у 34% галактик с «вереницами» из нашего каталога. На рис. 10 приведена двухцветная диаграмма $(U - B)_0 - (B - V)_0$, где ромбами мы отметили обновленные данные для выборки [3], крестиками и кружками показали положения объектов для нашей выборки. Для всех галактик с «вереницами» наблюдается хорошее согласие с кривой нормальных цветов, которая изображена на диаграмме сплошной линией.

3. МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР

В литературе обсуждались два возможных механизма формирования полигональных структур. А. Д. Чернин в работах [11, 12] предложил гидродинамический механизм, основанный на особенностях динамики глобальной галактической УВ. Из-за неустойчивости фронта УВ происходит локальное спрямление его участков и образование полигональной структуры. Этот механизм уверенно воспроизводится в численных расчетах различных авторов [13–17].

Возможен и иной механизм, когда в численных моделях N-тел на транзитной стадии формирования бара и спиралей можно выделить отдельные спрямленные сегменты рукавов [5]. Модели, основанные на резонансе 4/1, также позволяют описывать наблюдаемые особенности спиральной структуры [18, 19]. Механизм формирования «верениц», основанный на гравитационной неустойчивости бесстолкновительного звездного диска и/или резонансных явлениях, рассмотрен в работах [20–22]. При построении численных моделей звездных дисков в указанных работах использовались потенциалы, полученные в результате обработки изображений в H-диапазоне из обзора OSUBSGS (Ohio State University Bright Spiral Galaxy Survey). Их авторам удалось воспроизвести прямолинейные сегменты в рамках бесстолкновительной модели (N-тел), в частности, для галактики NGC 4303.

Не вдаваясь в обсуждение конкретных физических механизмов формирования «верениц» [21, 22], укажем на их некоторые отличительные особенности в звездных дисках по результатам нашего моделирования динамики N-тел. Подробное описание используемой численной модели приведено в работах [23, 24]. Спрямленные участки возникают в моделях с достаточно массивным гало с $\mu = M_h/M_d \gtrsim 3$ в пределах оптического радиуса. Только в таких моделях при различных начальных значениях параметра Тоомре $Q_T \lesssim 1$ возможно образование многорукавных и достаточно узких спиралей, в которых удастся проследить транзитные спрямленные участки («вереницы»). На рис. 11 показаны результаты наших численных моделей N-тел, в которых можно обнаружить спрямленные участки ветвей и даже почти изломы. Укажем на

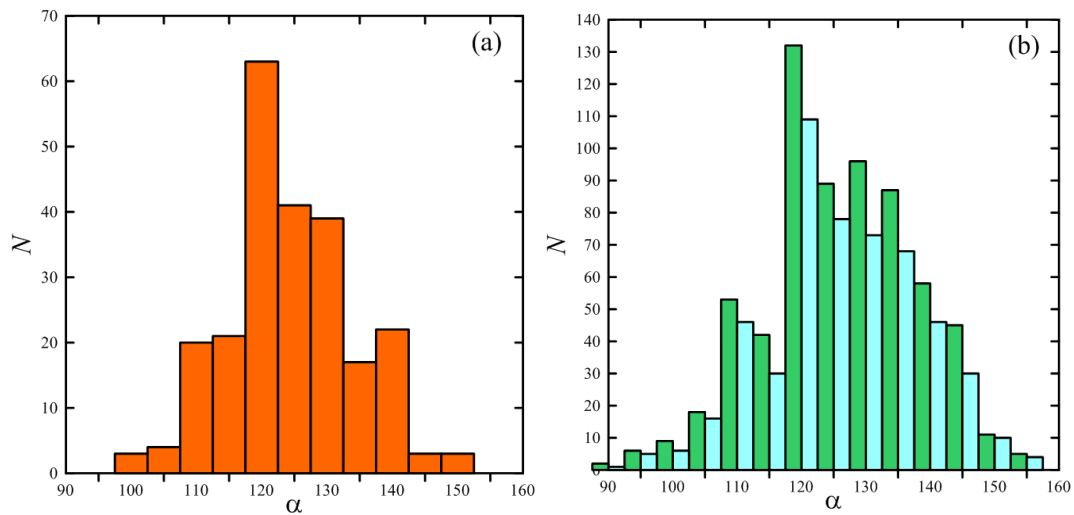


Рис. 8. Гистограмма распределения углов α между смежными «вереницами»: а) для всех галактик из выборки [3]; б) для нашей выборки галактик, светлые столбики отображают распределение галактик с углом наклона $i < 55^\circ$.

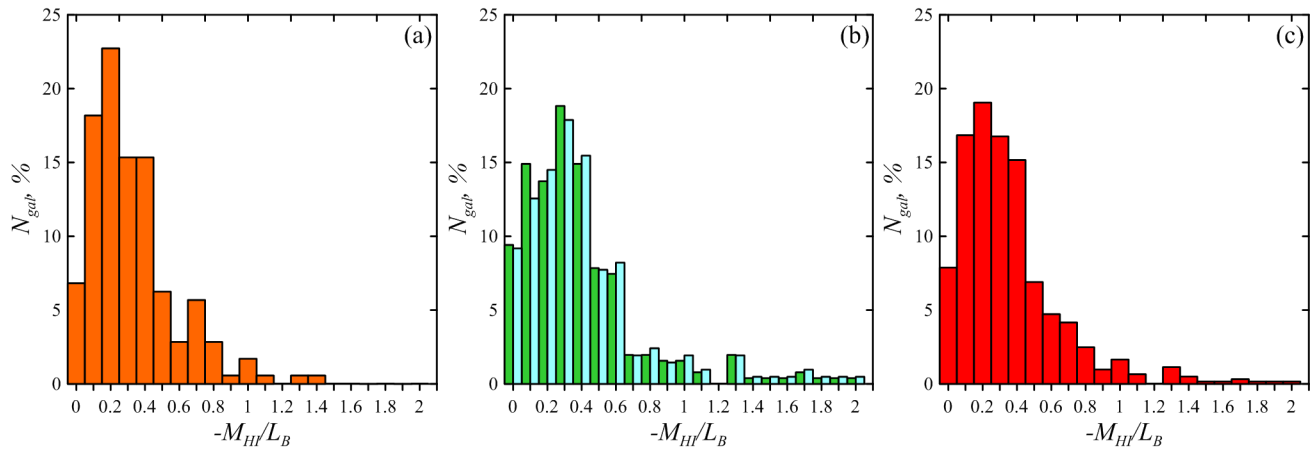


Рис. 9. Распределение величины $-M_{HI}/L_B$ (в солнечных единицах) для галактик с «вереницами»: (а) для полной выборки [3] данные перестроены с учетом современных данных из базы HyperLeda; (б) для нашей выборки галактик, светлые столбики отображают распределение галактик с углом наклона $i < 55^\circ$; (с) суммарная гистограмма для всех объектов с полигоналями.

некоторые особенности моделей звездных дисков с «вереницами»:

- спрямленные участки спиралей являются нестационарными, как и в случае «верениц» в газовом диске. Однако характерные времена их существования в горячей бесстолкновительной системе заметно меньше, чем в газе;
- эти структуры возникают достаточно редко на непродолжительное время, как правило, на начальных стадиях развития гравитационной неустойчивости;
- полигональная структура состоит из 1–3 «верениц», в отличие от газодинамических моделей, где формируется глобальная система «верениц».

Мы уже отмечали, что «вереницы» встречаются в старых звездных дисках по данным 2MASS

достаточно редко (см. п. 2.1). Для 18 объектов из нашей выборки спрямленные сегменты удается выделить по изображениям 2MASS, что указывает на большую амплитуду спиральной волны в массивном звездном диске. Трудно ожидать, что возмущение в газе (масса которого в среднем мала по сравнению с массой звезд) способно раскачать «вереницу» в компоненте старых звезд. Проблема усложняется нестационарным (транзитным) характером полигональной структуры, в этих условиях время гравитационного воздействия газовой структуры на звездную может быть недостаточным. По-видимому, для указанных 13 галактик первичным механизмом формирования «верениц» в звездной компоненте является сам звездный диск,

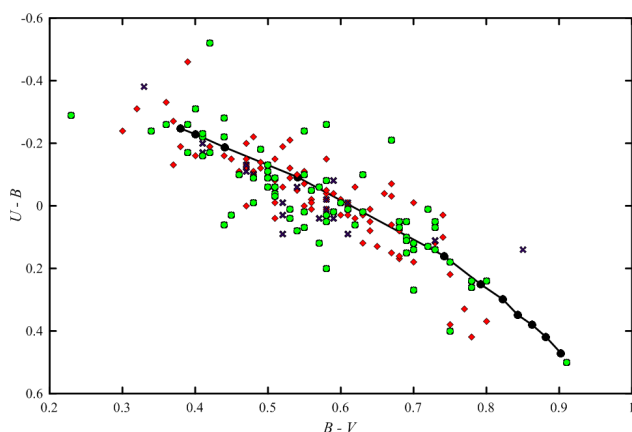


Рис. 10. Двухцветная диаграмма для галактик с «вереницами»: ромбами обозначены данные для полной выборки [3]; для нашей выборки кружками на диаграмме изображены галактики с $i < 55^\circ$, крестиками — объекты с $i \geq 55^\circ$. Показатели цвета исправлены за галактическое селективное поглощение и наклон диска галактики. Использованы актуальные данные из HyperLeda.

что не исключает затем параллельной работы газодинамического механизма.

Во многих случаях «вереницы» отождествляются с положениями гигантских молекулярных облаков и звездных комплексов, образование которых связано со спиральной волной плотности и галактическими ударными волнами [25–28]. В работах [11, 12] Чернин, основываясь на свойствах 1 и 2 из раздела 1, рассмотрел газодинамический механизм образования полигональной структуры. Проблема формирования прямых сегментов в газовом диске галактики в гравитационном потенциале гладкой спиральной волны звездной плотности была изучена в ряде численных экспериментов в работах [13–17], результаты которых согласуются практически со всеми наблюдаемыми свойствами галактик с «вереницами».

В численных моделях после формирования глобальной УВ ее фронт оказывается неустойчивым, что приводит к выходу УВ из спиральной гравитационной ямы и спрямлению фронта. В результате прямые участки УВ образуют полигональную структуру с характеристиками, сходными с наблюдаемыми [13]. Наш анализ позволяет выделить объекты, в которых работает, по-видимому, исключительно газодинамический механизм. Это справедливо в первую очередь для объектов, у которых на GALEX-изображениях спиральный узор и «вереницы» простираются за пределы звездного диска. Кроме того, в старом звездном диске по 2MASS удается для одного рукава обнаружить, как правило, 1–2 «вереницы» (только у NGC 4303 у каждого из трех рукавов можно выделить излом, а у одного рукава по три сегмента или более можно

вычленивать только у NGC 5156 и IC 5325). Поэтому в галактиках с большим числом «верениц» роль газодинамического механизма, по-видимому, доминирует.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе дополнительно к каталогу галактик с «вереницами» [3] мы выявили еще 276 объектов со спрямленными сегментами спирального узора из каталогов NGC и IC, что с учетом 130 объектов из NGC, вошедших в каталог [3], составило 406 галактик. В отличие от каталога [3], основанного на анализе объектов Паломарского атласа, мы исследовали все галактики NGC/IC, обеспечив полноту нашей выборки с учетом дополнительных ограничений на наблюдательные характеристики. Анализ изображений всех 7143 спиральных галактик, входящих в NGC/IC, позволил у 406 объектов выявить хотя бы одну «вереницу» в структуре спирального узора. Таким образом, частота встречаемости галактик с «вереницами» среди ближайших объектов составляет около 6%. У 77% из них имеются центральные бары. Для существенной части объектов с «вереницами» (38%) характерной особенностью являются кольца. Причем 13 (4%) объектов включены в каталог галактик ранних типов с внешними кольцами [29] (из них 9 объектов входят в нашу выборку, и 4 объекта вошли в каталог [3]).

В отличие от объектов каталога А. Д. Чернина и др. [3], в котором доля взаимодействующих галактик достигает 44% (90 объектов), наша выборка содержит около 13.8% (38 объектов) взаимодействующих или сильно асимметричных систем. В результате объединенная выборка из всех 480 объектов с «вереницами» содержит всего 128 взаимодействующих галактик (27%). Поэтому предположение в работе [3] о том, что среди галактик с «вереницами» взаимодействующие галактики встречаются почти вдвое чаще, не подтверждается при рассмотрении объединенной выборки, содержащей 480 объектов.

Среди 276 новых объектов 232 галактики (84%) имеют двухрукавный спиральный узор, 8% являются трехрукавными, и около 8% галактик характеризуется большим числом рукавов. Только у 12 объектов (4.3%) наблюдается ярко выраженная флоккулентная спиральная структура, что характерно и для выборки [3]. Среди наших полигональных галактик только у 59% «вереницы» обнаружены во всех рукавах, 28% галактик (78 объектов) содержат «вереницы» только в одном рукаве.

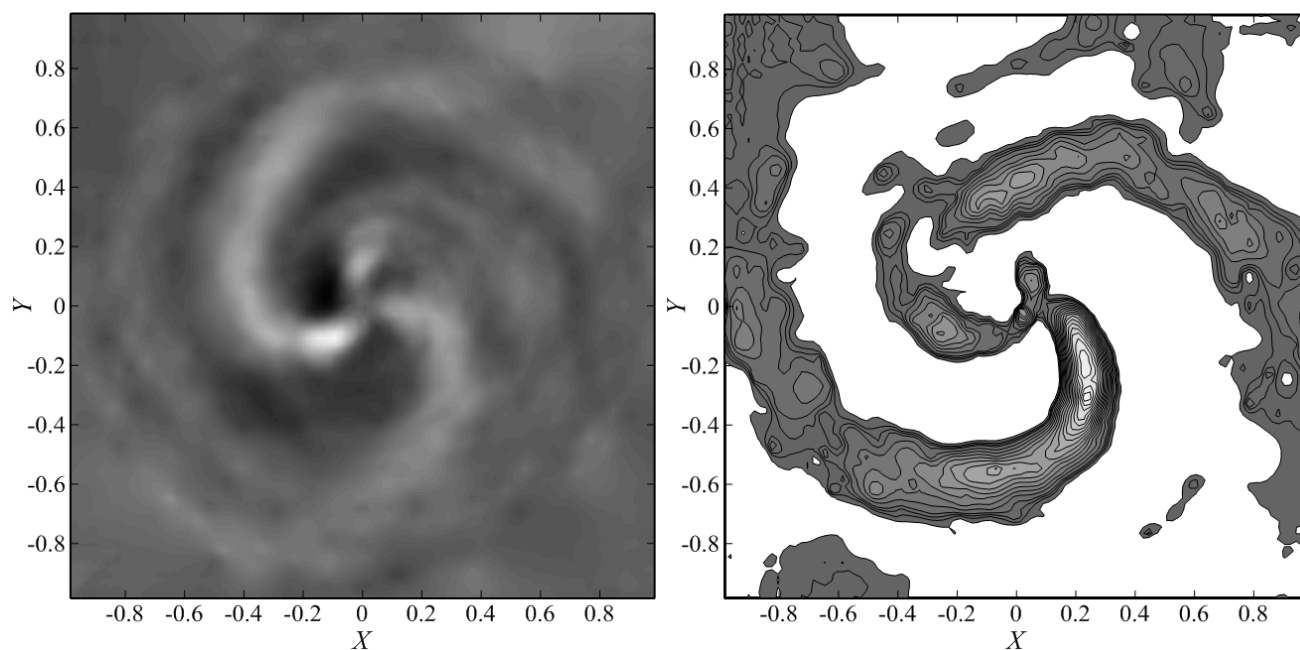


Рис. 11. Распределения возмущения логарифма поверхностной плотности в модели звездного диска в различные моменты времени (справа — показана только положительная часть возмущения). Параметр Тоомре в начальный момент времени $Q_T = 0.8$ в области $1/2 \lesssim r/r_d \lesssim 2$, r_d — экспоненциальная шкала диска.

Для большей части галактик из нашей выборки схематическое построение «верениц» в спиральных рукавах и дальнейшие измерения линейных и угловых размеров выполнялись по изображениям, полученным в оптическом диапазоне (93%). Для 164 объектов (59%) основным источником для выявления полигоналей стали изображения DSS: 145 объектов — DSS2 Blue (XJ+S), 19 объектов — DSS colored (цветное композитное DSS изображение). По изображениям SDSS DR9 color построены изображения «верениц» для 89 объектов из нашей выборки (32%). Для 4 галактик «вереницы» наилучшим образом выделяются по оптическим снимкам космического телескопа Хаббл (HST). Только для 19 галактик (7%) из всей нашей выборки в качестве основного изображения для выявления полигоналей использовались снимки GALEX, тем не менее «вереницы» в ультрафиолетовых лучах выявлены у 51 галактики (18%) из нашей выборки. В инфракрасном диапазоне (2MASS) спрямленные участки спиральных рукавов можно выделить у 18 объектов (7%), как правило, на этих снимках видны 1–2 «вереницы», в то время как на снимках, сделанных в оптическом или ультрафиолетовом диапазоне, можно выделить больше таких структур. Отметим также, что по снимкам DSS в красных лучах (DSS2 Red (F+R)) «вереницы» можно выделить только у 13 объектов из нашей выборки.

За исключением нашей оценки доли взаимодействующих галактик, все остальные рассмотренные

статистические характеристики нашей выборки хорошо согласуются с результатами анализа каталога А. Д. Чернина и др. [3]. Предположение о высоком содержании газа среди галактик с «вереницами», сделанное А. Д. Черниным с соавторами в [3], свидетельствует в пользу гидродинамического механизма образования спрямленных сегментов из-за неустойчивости мощных ударных волн, что согласуется с результатами численных расчетов [13–17]. Численные модели указывают на транзитный характер образования полигональных структур, которые возникают и исчезают в процессе эволюции галактического диска. На нестационарный характер спирального узора с «вереницами» косвенно указывают и данные по нашей выборке, поскольку у примерно 40% галактик спиральный узор не образует геометрически правильной структуры.

Отметим также, что в у галактик нашей выборки число «верениц» в среднем заметно выше, чем в каталоге [3]. Это, очевидно, связано с использованием изображений из более новых цифровых обзоров в различных диапазонах, в отличие от работы [3], в которой рассматривалась выборка однородных изображений в синих лучах из Паломарского атласа.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовалась информация, содержащаяся в астрономических базах HyperLeda.

Авторы выражают благодарность Рецензенту и Д. И. Макарову за ценные и полезные обсуждения. Работа выполнена в рамках проектной части госзадания министерства образования и науки РФ (проект № 2.852.2017/4.6). Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 15-02-06204, 15-52-12387, 16-02-00649. М. А. Бутенко благодарит Н. М. Кузьмина за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. A. Vorontsov-Vel'yaminov, *Astron. Zh.* **41**, 814 (1964).
2. A. D. Chernin, A. V. Zasov, V. P. Arkhipova, and A. S. Kravtsova, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **20**, 139 (2001).
3. A. D. Chernin, A. S. Kravtsova, A. V. Zasov, and V. P. Arkhipova, *Astronomy Reports* **45**, 841 (2001).
4. A. D. Chernin, A. V. Zasov, V. P. Arkhipova, and A. S. Kravtsova, *Astronomy Letters* **26**, 285 (2000).
5. R. Buta and F. Combes, *Fund. Cosmic. Physics* **17**, 95 (1996).
6. М. А. Бутенко, Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика **1**, 52 (2015).
7. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
8. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
9. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina, *Astron. J.* **145**, 101 (2013).
10. V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 1 (2016).
11. A. D. Chernin, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **18**, 393 (1999).
12. A. D. Chernin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **308**, 321 (1999).
13. S. A. Khoperskov, A. V. Khoperskov, M. A. Eremin, and M. A. Butenko, *Astronomy Letters* **37**, 563 (2011).
14. S. A. Khoperskov, M. A. Eremin, and A. V. Khoperskov, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **27**, 245 (2012).
15. E. A. Filistov, *Astronomy Reports* **56**, 9 (2012).
16. E. A. Filistov, *Astronomy Reports* **59**, 118 (2015).
17. М. А. Бутенко and С. А. Хоперсков, Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика **1 (14)**, 81 (2011).
18. G. Contopoulos and P. Grosbol, *Astron. and Astrophys.* **155**, 11 (1986).
19. P. A. Patsis, P. Grosbol, and N. Hiotelis, *Astron. and Astrophys.* **323**, 762 (1997).
20. P. Rautiainen, H. Salo, and E. Laurikainen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **388**, 1803 (2008).
21. P. Rautiainen and A. M. Mel'Nik, *Astron. and Astrophys.* **519**, A70 (2010).
22. A. M. Mel'nik and P. Rautiainen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **434**, 1362 (2013).
23. A. Khoperskov, D. Bizyaev, N. Tiurina, and M. Butenko, *Astronomische Nachrichten* **331**, 731 (2010).
24. S. A. Khoperskov, A. V. Khoperskov, I. S. Khrykin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427**, 1983 (2012).
25. Y. N. Efremov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 1531 (2010).
26. A. S. Gusev, F. Sakhibov, and Y. N. Efremov, *Astronomische Nachrichten* **336**, 401 (2015).
27. Y. N. Efremov, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **29**, 25 (2015).
28. N. Bastian, M. Gieles, Y. N. Efremov, and H. J. G. L. M. Lamers, *Astron. and Astrophys.* **443**, 79 (2005).
29. I. P. Kostyuk and O. K. Sil'chenko, *Astrophysical Bulletin* **70**, 280 (2015).

Galaxies with “Rows”: a New Catalog

M. A. Butenko and A. V. Khoperskov

Galaxies with “rows” in Vorontsov-Velyaminov’s terminology stand out among the variety of spiral galactic patterns. A characteristic feature of such objects is the sequence of straight-line segments that forms the spiral arm. In 2001 A. Chernin and co-authors published a catalog of such galaxies which includes 204 objects from the Palomar Atlas. In this paper, we supplement the catalog with 276 objects based on an analysis of all the galaxies from the New General Catalogue and Index Catalogue. The total number of NGC and IC galaxies with rows is 406, including the objects of Chernin et al. (2001). The use of more recent galaxy images allowed us to detect more “rows” on average, compared with the catalog of Chernin et al. When comparing the principal galaxy properties we found no significant differences between galaxies with rows and all S-type NGC/IC galaxies. We discuss two mechanisms for the formation of polygonal structures based on numerical gas-dynamic and collisionless N-body calculations, which demonstrate that a spiral pattern with rows is a transient stage in the evolution of galaxies and a system with a powerful spiral structure can pass through this stage. The hypothesis of A. Chernin et al. (2001) that the occurrence frequency of interacting galaxies is twice higher among galaxies with rows is not confirmed for the combined set of 480 galaxies. The presence of a central stellar bar appears to be a favorable factor for the formation of a system of “rows.”

Keywords: *galaxies: spiral—galaxies: statistics—galaxies: structure*