УДК 524.4-32

# ОЦЕНКА ВОЗРАСТА ВОЛНЫ РЭДКЛИФФА ПО РАССЕЯННЫМ ЗВЕЗДНЫМ СКОПЛЕНИЯМ

## © 2025 В. В. Бобылев<sup>1\*</sup>, Н. Р. Ихсанов<sup>1</sup>, А. Т. Байкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия Поступила в редакцию 7 ноября 2024 года; после доработки 11 декабря 2024 года; принята к публикации 21 января 2025 года

Проанализированы четыре выборки рассеянных звездных скоплений (P3C) со средним возрастом 5.2, 18.6, 40 и 61 млн лет. Отбор этих P3C осуществлен из узкой зоны, наклоненной к галактической оси *у* на угол 25°. Спектральный анализ вертикальных положений и скоростей отобранных скоплений показал, что с волной Рэдклиффа связаны P3C не старше 30 млн лет. По P3C со средним возрастом 5.2 млн лет получены следующие оценки характеристик волны Рэдклиффа:  $z_{\rm max} = 117 \pm 12$  пк с длиной волны  $\lambda = 4.55 \pm 0.14$  кпк, амплитуда возмущения вертикальных скоростей  $W_{\rm max} = 4.86 \pm 0.19$  км с<sup>-1</sup> с длиной волны  $\lambda = 1.74 \pm 0.08$  кпк. По P3C со средним возрастом 18.6 млн лет аналогичные оценки таковы:  $z_{\rm max} = 54 \pm 5$  пк и  $\lambda = 6.30 \pm 0.12$  кпк, амплитуда возмущения вертикальных скоростей  $W_{\rm max} = 7.90 \pm 0.16$  км с<sup>-1</sup> и  $\lambda = 0.83 \pm 0.11$  кпк. Подтверждено радиальное движение волны Рэдклиффа в сторону от галактического центра. Скорость такого движения составляет 10 пк в млн лет. По нашему мнению, пространственное распределение P3C моложе 30 млн лет не противоречит гипотезе о связи волны Рэдклиффа с воздействием ударных волно т взрывов сверхновых, возникших на протяженном фронте, сопоставимом по масштабу со всей волной, то есть размером около 2 кпк.

Ключевые слова: Галактика: кинематика и динамика — рассеянные скопления и ассоциации: общие сведения

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Волну Рэдклиффа впервые обнаружили Alves et al. (2020) при изучении пространственного распределения большой выборки молекулярных облаков, расположенных в околосолнечной окрестности. Авторы выявили узкую цепочку облаков, вытянутую практически в линию длиной около 2.7 кпк в галактической плоскости xy. Главной же особенностью этой структуры, названной волной Рэдклиффа, является волнообразный характер распределения в вертикальном направлении. По мнению Alves et al. (2020), волна имеет затухающий характер, а максимальное значение координаты  $z \sim 160$  пк наблюдается в непосредственной близости от Солнца.

Волнообразный характер поведения вертикальных координат проявляется в распределении межзвездной пыли (Lallement et al., 2022; Edenhofer et al., 2024), молекулярных облаков (Zucker et al., 2023), мазеров и радиозвезд (Bobylev et al., 2022), звезд типа Т Тельца (Li and Chen, 2022), массивных OB-звезд (Donada and Figueras, 2021; Thulasidharan et al., 2022), а также молодых рассеянных звездных скоплений (Donada and Figueras, 2021).

В последнее время как раз с использованием молодых рассеянных звездных скоплений (РЗС) были получены интересные результаты о характере вертикальных скоростей объектов в волне Рэдклиффа (Alonso-Santiago et al., 2024; Bobylev and Bajkova, 2024; Konietzka et al., 2024; Zhu et al., 2024). При этом были использованы разные каталоги с данными о РЗС — из работ Hunt and Reffert (2023), а также Cantat-Gaudin et al. (2020). В итоге было установлено, что вертикальные скорости молодых РЗС в волне Рэдклиффа имеют волнообразный характер со значением максимальной скорости 5-15 км с<sup>-1</sup>. Помимо вертикальных колебаний, Konietzka et al. (2024) нашли свидетельства того, что волна Рэдклиффа дрейфует радиально наружу от центра Галактики со скоростью около 5 км с $^{-1}$ . Zhu et al. (2024) смоделировали изменения параметров волны за последние 40 млн лет.

К настоящему времени предложен ряд гипотез, объясняющих происхождение волны Рэдклиффа. Fleck (2020) связывает ее происхождение

<sup>\*</sup>E-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

с неустойчивостью Кельвина—Гельмгольца, которая возникает в диске Галактики из-за разности скоростей вращения гало темной материи и диска. Обсуждается гипотеза о воздействии на галактический диск внешнего ударника (Thulasidharan et al., 2022). В качестве ударника может выступать карликовая галактика или шаровое скопление. Пролет такого массивного тела через галактический диск может вызвать волновые возмущения, распространяющиеся по диску.

Li et al. (2024) промоделировали трехмерную эволюцию локального межзвездного газа и показали, что гравитационное воздействие Галактики растягивает волну Рэдклиффа почти вдвое больше ее текущей длины на временной шкале 45 млн лет. Моделирование также показывает образование новых нитей и слияние имеющихся нитей.

Marchal and Martin (2023) связывают происхождение волны Рэдклиффа с эволюцией Северного Полярного Шпура. По их мнению, узкая цепочка вещества (из которого сформировалась волна Рэдклиффа) возникла на внешней границе Северного Полярного Шпура в результате воздействия ударных волн нескольких сверхновых и их звездных ветров. Близкой является гипотеза, развиваемая Konietzka et al. (2024), о связи волны Рэдклиффа с эволюцией Местного пузыря. В любом случае здесь ударные волны возникли в прошлом при взрывах сверхновых в ближайшей к Солнцу ОВ-ассоциации Скорпиона-Центавра (Sco-Cen). Однако общепризнанной гипотезы формирования волны Рэдклиффа в настоящее время нет.

Целью настоящей работы является оценка параметров волны Рэдклиффа по координатам и скоростям РЗС различного возраста и установление предельного верхнего возраста РЗС, которые еще принадлежат этой волне. Используется каталог Hunt and Reffert (2023), в котором кинематические характеристики скоплений взяты из каталога Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023), а также имеются оценки индивидуального возраста РЗС.

## 2. МЕТОД

В настоящей работе мы используем прямоугольную систему координат x, y, z, в которой ось xнаправлена от Солнца к центру Галактики, направление оси y совпадает с направлением вращения Галактики, а ось z направлена в северный галактический полюс. Используем также галактоцентрическую прямоугольную систему координат X, Y, Z, в которой ось X направлена от центра Галактики к Солнцу, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики, а ось Z направлена в северный галактический полюс. Таким образом, в этих двух системах координат различаются только направления осей *x* и *X*.

Ориентация волны Рэдклиффа по отношению к осям y и Y отличается только знаком. Например, в системе координат xy переход к штрихованной оси y' при повороте на угол  $\beta$  осуществляется по формуле

$$y' = y\cos\beta + x\sin\beta.$$

Для изучения периодической структуры в координатах и скоростях звезд Bobylev et al. (2022) предложили использовать спектральный анализ на основе стандартного преобразования Фурье исходной последовательности z(y'):

$$F(z(y')) = \int z(y')e^{-j2\pi y'/\lambda}$$
  
=  $U(\lambda) + jV(\lambda) = A(\lambda)e^{j\varphi(\lambda)},$  (1)

где  $A(\lambda) = \sqrt{U^2(\lambda) + V^2(\lambda)}$  — амплитуда спектра, а  $\varphi(\lambda) = \arctan(V(\lambda)/U(\lambda))$  — фаза спектра. Особенностью настоящего подхода является поиск не просто монохроматической волны с постоянной амплитудой, а волны, наиболее точно описывающей исходные данные, спектр которой совпадает с главным пиком (лепестком) вычисленного спектра в диапазоне длин волн от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$  (внутри этих границ спектр плавно уменьшается, начиная с максимального значения, а вне — начинает увеличиваться).

В итоге имеем искомую плавную кривую, аппроксимирующую исходные данные, которая вычисляется по формуле обратного преобразования Фурье в определенном нами диапазоне длин волн:

$$z(y') = 2k \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} A(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi y'}{\lambda} + \varphi(\lambda)\right) d\lambda, \quad (2)$$

где k — коэффициент, вычисляемый из условия минимума невязки.

## 3. ДАННЫЕ

В настоящей работе используется каталог Hunt and Reffert (2023), который содержит 4780 РЗС. Для всех РЗС в этом каталоге имеются оценки возраста, гелиоцентрического расстояния и кинематические характеристики. Средние значения лучевых скоростей, вычисленные по данным каталога Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023), имеются для большого количества РЗС, хотя и не для всех.

(b) (a) 9 5.2 Myr 18.6 Myr 8 7 X, kpc (d) (c) 9 40 Myr 61 Myr 8 7 -2 -2 \_1 3 2 3 Y, kpc

**Рис. 1.** Распределение РЗС в проекции на галактическую плоскость *XY* для выборок со средним возрастом 5.2 млн лет (а), 18.6 млн лет (b), 40 млн лет (c) и 61 млн лет (d). Синей и оранжевой линиями показаны отрезки ближайших к Солнцу спиральных рукавов, тонкими серыми линиями обозначены границы области отбора РЗС.

В настоящей работе отбор скоплений проводится в зоне, ограниченной двумя линиями на плоскости *xy*:

$$x = y \operatorname{tg} \beta - 0.65,$$
  

$$x = y \operatorname{tg} \beta + 0.00,$$
(3)

где значение угла  $\beta = 25^{\circ}$  было подобрано так, чтобы волна проявлялась наилучшим образом. Центр зоны отбора не проходит через начало координат, а сечет ось x в точке  $x_1$ , поэтому переход к оси y' был выполнен по формуле

$$y' = y\cos\beta + (x - x_1)\sin\beta,\tag{4}$$

где  $x_1 = -0.28$  кпк.

При формировании выборок мы распределили РЗС по возрастам:

- меньше 10 млн лет;
- 2) в интервале 10-30 млн лет;
- 3) в интервале 30-50 млн лет;
- 4) от 50 до 70 млн лет.

После отбора, согласно граничным условиям по формуле (3), в первую выборку вошли 219 РЗС, средний возраст 5.2 млн лет, из них для 211 РЗС в каталоге Hunt and Reffert (2023) даны лучевые скорости. Во второй выборке 138 РЗС (со средним возрастом 16.6 млн лет), из них для 129 имеются лучевые скорости. Третья выборка включает 93 РЗС, при среднем возрасте 40 млн лет, из них для 92 имеются лучевые скорости. В четвертой выборке из 112 РЗС (со средним возрастом 61 млн лет) для 109 имеются лучевые скорости. На рис. 1 дано распределение на галактической плоскости *XY* отобранных для анализа выборок P3C.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из анализа координат выборки РЗС со средним возрастом 5.2 млн лет получена оценка максимального значения амплитуды вертикальных возмущений  $z_{\rm max}$  с длиной волны этих возмущений  $\lambda$ :

$$z_{\max} = 117 \pm 12$$
 пк,  
 $\lambda = 4.55 \pm 0.14$  кпк.
(5)

А по вертикальным скоростям этой выборки РЗС получена оценка максимального значения их скорости возмущения  $W_{\rm max}$  с длиной волны этих возмущений  $\lambda$ :

$$W_{\rm max} = 4.86 \pm 0.19$$
 км с<sup>-1</sup>,  
 $\lambda = 1.74 \pm 0.08$  кпк. (6)

Результаты спектрального анализа положений и скоростей этих РЗС отражены на рис. 2.

Отметим, что в нашем методе длина волны определяется максимальным значением амплитудного спектра анализируемой последовательности. Из рис. 2 видно, что максимальное значение спектра (панель (b)) последовательности (панель (a)) соответствует длине волны более 4 кпк (точнее,



**Рис.** 2. Координаты z РЗС из выборки со средним возрастом 5.2 млн лет в зависимости от расстояния y' (a) и их спектр мощности (b), вертикальные скорости W этих РЗС в зависимости от расстояния y' (c) и их спектр мощности (d). Периодические кривые, показанные сплошными жирными линиями, отражают результаты спектрального анализа; подробнее см. в тексте.

4.55 кпк, что обозначено вертикальной линией на панели (b)). На рис. 2а мы добавили монохроматическую волну (серым цветом) с этой длиной. Волна, соответствующая лепестку спектра с максимальным значением и более точно описывающая данные, изображена красным цветом. Из сопоставления этих двух кривых (серой и красной) можно видеть, что длины волн совпадают, поскольку практически совпадают точки пересечения обеих кривых с осью y', из которых волны начинают двигаться вниз (то есть в одной фазе).

Преобразование Фурье вертикальных скоростей показывает, помимо пика на длине волны больше 4 кпк, гораздо более значимый пик на длине волны 1.74 кпк, который определяет более тонкую структуру колебаний вертикальных скоростей. На рис. 2c, d нанесены линии, аналогичные тем, что на рис. 2a, b. Из приведенного спектра видно, что синхронная предыдущему случаю часть спектра не является доминирующей, поэтому длина волны последовательности скоростей определяется пиком на волне 1.74 кпк.

По координатам РЗС выборки со средним возрастом 18.6 млн лет получена оценка амплитуды вертикальных возмущений *z*<sub>max</sub> с длиной волны этих возмущений λ:

$$z_{\text{max}} = 54 \pm 5$$
 пк,  $\lambda = 6.30 \pm 0.12$  кпк; (7)

а по их скоростям — следующая оценка:

$$W_{\rm max} = 7.90 \pm 0.16 \,\,{\rm km}\,{\rm c}^{-1}, \lambda = 0.83 \pm 0.11 \,{\rm km}{\rm k}.$$
 (8)

Результаты спектрального анализа положений и скоростей этих РЗС отражены на рис. 3.

Вертикальные координаты двух выборок РЗС со средним возрастом 40 млн лет и 61 млн лет, а также их вертикальные скорости W в зависимости от расстояния y' даны на рис. 4. Для этих выборок мы не приводим спектры с целью экономии места.

По выборке P3C со средним возрастом 40 млн лет получены следующие оценки:  $z_{\rm max} = 43 \pm 2$  пк с длиной волны  $\lambda = 0.61 \pm 0.02$  кпк, амплитуда возмущения вертикальных скоростей  $W_{\rm max} = 5.07 \pm 0.14$  км с<sup>-1</sup>, а длина волны, най-денная по вертикальным скоростям, составляет  $\lambda = 1.78 \pm 0.04$  кпк.

По выборке P3C со средним возрастом 61 млн лет найдено:  $z_{\rm max} = 51 \pm 2$  пк с длиной волны  $\lambda = 0.02 \pm 0.02$  кпк,  $W_{\rm max} = 10 \pm 2$  км с<sup>-1</sup>, а длина волны, найденная по вертикальным скоростям, составляет  $\lambda = 1.05 \pm 0.03$  кпк.

#### 5. ОБСУЖДЕНИЕ

#### 5.1. Результаты спектрального анализа

Главным критерием связи рассматриваемых нами РЗС с волной Рэдклиффа является характер



**Рис. 3.** Координаты z РЗС из выборки со средним возрастом 18.6 млн лет в зависимости от расстояния y' (a) и их спектр мощности (b), вертикальные скорости этих РЗС W в зависимости от расстояния y' (c) и их спектр мощности (d). Периодические кривые, показанные сплошными жирными линиями, отражают результаты спектрального анализа.



**Рис. 4.** Координаты z РЗС и их вертикальные скорости W в зависимости от расстояния y' из выборки со средним возрастом 40 млн лет, панели (а) и (b) соответственно; для РЗС из выборки со средним возрастом 61 млн лет — панели (с) и (d).

волны в их вертикальных координатах. К выборке наиболее молодых РЗС вопросов нет (рис. 2) — зависимость их координат z от y' имеет практически тот же вид, что и у молекулярных облаков в работе Alves et al. (2020). Даже зависимость вертикальных скоростей W от y' этой выборки РЗС (рис. 2с) носит схожий, хотя и не полностью идентичный характер.

Параметры (7) находятся в неплохом согласии с найденными по более молодым РЗС (5). Поэтому мы считаем, что РЗС с возрастом из интервала 10–30 млн лет связаны с волной Рэд-

клиффа. Распределение же вертикальных скоростей на рис. Зс отличается от данных на рис. 2с. На рис. Зс видим сильный всплеск положительных вертикальных скоростей в непосредственной окрестности Солнца (в радиусе менее 200 пк). Указанное отличие, по-видимому, обусловлено иными причинами. Тем более что наличие такого всплеска наблюдается и в вертикальных скоростях более старых РЗС (рис. 4b, d). Сложный спектр скоростей выборки РЗС с возрастом из интервала 10-30 млн лет обусловлен различными факторами. В нем имеются три максимума (рис. 3d), один из которых дает длину волны около 2 кпк, другой 4 кпк, что сближает этот спектр со спектром более молодой выборки (рис. 2d). Поэтому мы считаем, что большое количество РЗС в этой выборке имеет тесную связь с волной Рэдклиффа.

Преобладание высокочастотных гармоник в зависимостях z от y' на рис. 4а, с делает очевидным вывод о том, что выборки РЗС со средним возрастом 40 млн лет и 61 млн лет не связаны с волной Рэдклиффа.

В конечном итоге можем заключить, что с волной Рэдклиффа связаны РЗС не старше 30 млн лет.

#### 5.2. Гипотезы возникновения волны Рэдклиффа

#### 5.2.1. Взрывы сверхновых и волна Рэдклиффа

В недавней работе Marchal and Martin (2023) была высказана гипотеза о том, что волна Рэдклиффа является результатом воздействия на газопылевые облака фронтов ударных волн, возникших на внешней границе Северного Полярного Шпура.

Известно, что Солнце расположено практически в центре Местного пузыря, внешняя граница которого простирается не далее 100 пк от Солнца. Образование Местного пузыря тесно связано с эволюцией звезд в OB-ассоциации Sco-Cen (Breitschwerdt and de Avillez, 2006; Schulreich et al., 2018). Например, Fuchs et al. (2006) показали, что Местный пузырь начал формироваться 10–15 млн лет назад, и с тех пор в ассоциации Sco-Cen взорвались в качестве сверхновых 14–20 массивных звезд.

O'Neill et al. (2024) построили трехмерную модель магнитного поля Местного рукава. Авторы показали, что в локальной солнечной окрестности магнитное поле Галактики ориентировано параллельно волне Рэдклиффа. Обнаружено также, что Местный пузырь более вытянут в этом направлении, а молекулярные облака на его оболочке преимущественно сконцентрированы в перпендикулярном направлении.



**Рис. 5.** Среднее положение двух выборок РЗС; желтым кружком отмечено положение Солнца; стрелки указывают направление движения фронтов ударных волн, образовавшихся после взрывов сверхновых в OB-ассоциации Sco-Cen.

По сравнению с Местным пузырем Северный Полярный Шпур является более масштабным явлением. При этом о расположении Северного Полярного Шпура имеются существенно различающиеся точки зрения. Одни авторы предполагают, что геометрический центр этого пузыря лежит на расстоянии 150–200 пк от Солнца (Lallement, 2023). Другие относят центр Северного Полярного Шпура существенно дальше — на расстояние 3–4 кпк от Солнца (Churazov et al., 2024) или даже помещают его в центре Галактики (Sofue and Kataoka, 2021).

По координатам двух наиболее молодых выборок РЗС нами были определены средние линии, вдоль которых эти скопления концентрируются. Параметры линий определены методом наименьших квадратов. Результаты отражены на рис. 5. Из этого рисунка мы можем видеть, что выборки РЗС разного возраста смещены друг относительно друга на небольшое расстояние. По нашему мнению, такое их расположение не противоречит гипотезе о связи волны Рэдклиффа с фронтом ударной волны, возникшей после взрывов сверхновых в OB-ассоциации Sco-Cen.

Стрелками на рис. 5 грубо показано направление движения предполагаемых фронтов ударных волн, образовавшихся после взрывов сверхновых в OB-ассоциации Sco-Cen. И вначале образовались P3C, расположенные ближе к эпицентрам взрывов, то есть P3C со средним возрастом 18.6 млн лет. Затем, когда фронт ударной волны продвинулся дальше от эпицентра взрывов, образовались P3C со средним возрастом 5.2 млн лет. Здесь имеем аналогию с градиентом возрастов (поперек спирального рукава) звезд в спиральной волне плотности.

Таким образом, имеется принципиальное согласие с результатом работы Konietzka et al. (2024),



**Рис. 6.** Положение пузырей, остатков взрывов сверхновых и ряда молодых ОВ-ассоциаций в широкой околосолнечной области. Оранжевой линией показано положение волны Рэдклиффа, найденное в настоящей работе по выборке наиболее молодых РЗС. Заливкой выделены главные пузыри, а именно: Местный с Солнцем в центре, Северный Полярный Шпур (N) и впервые описанный Heiles (1998) новый сверхпузырь (New SuperBubble, NSB). Рисунок адаптирован нами согласно рис. 8 из работы Heiles (1998).

где впервые был обнаружен радиальный дрейф волны Рэдклиффа в плоскости Галактики. Более того, по данным рис. 5 в области Солнца (видим, что линии на рисунке не совсем параллельны) мы оценили, что скорость радиального движения волны составляет около 10 пк в млн лет.

На рис. 6 дано положение центров и внешние границы пузырей (областей разреженного горячего газа в межзвездной среде) в широкой околосолнечной области согласно работе Heiles (1998). Как можно видеть из этого рисунка, имеется тесная связь в расположении центров Местного пузыря, Северного Полярного Шпура, сверхпузыря NSB и Пузыря в Эридане (обозначен буквой «Е» на рисунке) с положением волны Рэдклиффа. Анализ рис. 6 позволяет сделать заключение о том, что волна Рэдклиффа может быть результатом воздействия на газопылевые облака ударных волн, возникших не только на внешней границе Северного Полярного Шпура, но и на существенно более протяженном фронте, сопоставимом по масштабу со всей волной, то есть на протяжении примерно 2 кпк.

## 5.2.2. Магнитное поле и волна Рэдклиффа

Гипотеза о магнитной природе волны Рэдклиффа, основанная на сценарии локального всплытия крупномасштабного магнитного поля галактического диска вследствие так называемой Паркеровской неустойчивости (Parker, 1966), в последнее время стала предметом обсуждений. Мотивом к этому послужили результаты исследования геометрии магнитного поля методом поляриметрических наблюдений объектов, расположенных в направлении волны Рэдклиффа, представленные в работе Panopoulou et al. (2025). Авторы этой статьи обнаружили, что позиционный угол линейной поляризации излучения объектов, расположенных в направлении волны Рэдклиффа, существенно зависит от расстояния до этих источников. В частности, угол поляризации звезд, расположенных в 600 пк окрестности волны Рэдклиффа, повторяет ее пространственную структуру с характерным наклоном к плоскости Галактики на угол, среднее значение которого достигает 10°-18°. В области пересечения волны Рэдклиффа с плоскостью Галактики угол наклона волны, как и позиционный угол поляризации, на участке с линейным размером порядка 350 пк достигает величины 10°-30°. При этом позиционные углы поляризации излучения звезд, расположенных на расстоянии более 2 кпк, отличаются постоянством и преимущественно лежат в галактической плоскости.

Совпадение направления угла поляризации с направлением «хребта» волны Рэдклиффа, по мнению Panopoulou et al. (2025), является серьезным аргументом к исследованию гипотезы о магнитной природе этого явления. Они отмечают, что параметры волны Рэдклиффа соответствуют ожидаемым пространственным и временным масштабам возмущений, вызванных Паркеровской неустойчивостью магнитного поля в галактическом диске при условии наличия энергичного триггера в форме вспышки сверхновой. Здесь следует также отметить, что кинетическая энергия вещества, формирующего волну Рэдклиффа,

$$K_{\rm rw} \simeq 10^{51} \, {\rm spr} \times \left(\frac{M_{\rm rw}}{10^6 \, M_{\odot}}\right) \left(\frac{v_{\rm rw}}{10^6 \, {\rm cm} \, {\rm c}^{-1}}\right)^2,$$
(9)

соответствует энергии магнитного поля напряженностью около  $10^{-6}$  Гс в галактическом диске толщиной примерно 300 пк на масштабе около 2 кпк. Это позволяет рассматривать задачу о локальном возмущении вещества галактического диска в рамках сценария развития неустойчивости его магнитного поля без привлечения дополнительных предположений об источнике энергии этих возмущений (см. также Kaplan and Pikel'ner (1979) и приведенную там литературу).

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным каталога рассеянных звездных скоплений (Hunt and Reffert, 2023) сформированы четыре выборки с возрастами из интервалов 0–10, 10–30, 30–50 и 50–70 млн лет. Проведен отбор потенциально связанных с волной Рэдклиффа РЗС из узкой зоны отбора, наклоненной к галактической оси y на угол 25°. Спектральный анализ вертикальных положений и скоростей отобранных РЗС показал, что с волной Рэдклиффа связаны РЗС не старше 30 млн лет.

По выборке РЗС со средним возрастом 5.2 млн лет (интервал 0–10 млн лет) получены следующие оценки характеристик волны Рэд-клиффа:  $z_{\rm max} = 117 \pm 12$  пк с длиной волны  $\lambda = 4.55 \pm 0.14$  кпк, а также амплитуда возмущения вертикальных скоростей  $W_{\rm max} = 4.86 \pm 0.19$  км с<sup>-1</sup> и длина волны  $\lambda = 1.74 \pm 0.08$  кпк, найденная по вертикальным скоростям.

По выборке РЗС со средним возрастом 18.6 млн лет (интервал 10–30 млн лет) получены следующие оценки:  $z_{\rm max} = 54 \pm 5$  пк с длиной волны  $\lambda = 6.30 \pm 0.12$  кпк, амплитуда возмущения вертикальных скоростей  $W_{\rm max} = 7.90 \pm 0.16$  км с<sup>-1</sup>

с длиной волны  $\lambda = 0.83 \pm 0.11$  кпк. Причем в вертикальных скоростях РЗС старше 10 млн лет наблюдается сильный всплеск положительных скоростей в непосредственной окрестности Солнца (в радиусе менее 200 пк), что сильно влияет на результат спектрального анализа вертикальных скоростей. Такой всплеск, по-видимому, обусловлен причинами, не связанными с возникновением волны Рэдклиффа.

Подтверждено радиальное (в сторону от галактического центра) движение волны Рэдклиффа. Скорость такого движения составляет 10 пк в млн лет. По нашему мнению, пространственное распределение РЗС разного возраста (не старше 30 млн лет) не противоречит гипотезе о связи волны Рэдклиффа с воздействием ударных волн от взрывов сверхновых, возникших не только на внешней границе Северного Полярного Шпура, но и на существенно более протяженном фронте, сопоставимом по масштабу со всей волной, то есть размером примерно 2 кпк.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета обсерватории.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- J. Alonso-Santiago, A. Frasca, A. Bragaglia, et al., Astron. and Astrophys. 691, id. A317 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202452204
- J. Alves, C. Zucker, A. A. Goodman, et al., Nature 578 (7794), 237 (2020). DOI:10.1038/s41586-019-1874-z
- 3. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Research in Astron. and Astrophys. 24 (3), id. 035010 (2024). DOI:10.1088/1674-4527/ad113f
- 4. V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, and Y. N. Mishurov, Astronomy Letters **48** (8), 434 (2022). DOI:10.1134/S1063773722070027
- D. Breitschwerdt and M. A. de Avillez, Astron. and Astrophys. 452 (1), L1 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20064989

- 6. T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, et al., Astron. and Astrophys. 640, id. A1 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202038192
- 7. E. Churazov, I. I. Khabibullin, A. M. Bykov, et al., Astron. and Astrophys. 691, id. L22 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202451762
- 8. J. Donada and F. Figueras, arXiv eprints astro/ph:2111.04685 (2021). DOI:10.48550/arXiv.2111.04685
- 9. G. Edenhofer, C. Zucker, P. Frank, et al., Astron. and Astrophys. 685, id. A82 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202347628
- 10. R. Fleck, Nature **583** (7816), E24 (2020). DOI:10.1038/s41586-020-2476-5
- B. Fuchs, D. Breitschwerdt, M. A. de Avillez, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **373** (3), 993 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.11044.x
- 12. C. Heiles, Astrophys. J. **498** (2), 689 (1998). DOI:10.1086/305574
- E. L. Hunt and S. Reffert, Astron. and Astrophys. 673, id. A114 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346285
- S. A. Kaplan and S. B. Pikel'ner, *Physics of the Interstellar Medium* (Izdatel'stvo Nauka, Moscow, 1979).
- R. Konietzka, A. A. Goodman, C. Zucker, et al., Nature 628 (8006), 62 (2024). DOI:10.1038/s41586-024-07127-3
- R. Lallement, Comptes Rendus. Physique 23 (S2), 1 (2023). DOI:10.5802/crphys.97
- R. Lallement, J. L. Vergely, C. Babusiaux, and N. L. J. Cox, Astron. and Astrophys. 661, id. A147 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142846
- 18. G.-X. Li and B.-Q. Chen, Monthly Notices Royal Astron. Soc. 517 (1), L102 (2022). DOI:10.1093/mnrasl/slac050

- G.-X. Li, J.-X. Zhou, and B. Chen, Research Notes Amer. Astron. Soc. 8 (12), id. 316 (2024). DOI:10.3847/2515-5172/ada0bf
- 20. A. Marchal and P. G. Martin, Astrophys. J. **942** (2), id. 70 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/aca4d2
- 21. T. J. O'Neill, A. A. Goodman, J. D. Soler, et al., arXiv e-prints astro/ph:2410.17341 (2024). DOI:10.48550/arXiv.2410.17341
- 22. G. V. Panopoulou, C. Zucker, D. Clemens, et al., Astron. and Astrophys. 694, id. A97 (2025). DOI:10.1051/0004-6361/202450991
- 23. E. N. Parker, Astrophys. J. **145**, 811 (1966). DOI:10.1086/148828
- 24. M. M. Schulreich, D. Breitschwerdt, J. Feige, and C. Dettbarn, Galaxies 6 (1), id. 26 (2018). DOI:10.3390/galaxies6010026
- 25. Y. Sofue and J. Kataoka, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **506** (2), 2170 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab1857
- 26. L. Thulasidharan, E. D'Onghia, E. Poggio, et al., Astron. and Astrophys. 660, id. L12 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142899
- 27. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), Astron. and Astrophys. 674, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
- 28. Z.-K. Zhu, M. Fang, Z.-J. Lu, et al., Astrophys. J. 971 (2), id. 167 (2024). DOI:10.3847/1538-4357/ad66cd
- 29. C. Zucker, J. Alves, A. Goodman, et al., ASP Conf. Ser., **534**, 43 (2023). DOI:10.48550/arXiv.2212.00067

## Age Estimation of the Radcliffe Wave from Open Star Clusters

#### V. V. Bobylev<sup>1</sup>, N. R. Ikhsanov<sup>1</sup>, and A. T. Bajkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Main (Pulkovo) Astronomical Observatory, St. Petersburg, 196140 Russia

Four samples of open star clusters (OSCs) with average ages of 5.2, 18.6, 40, and 61 Myr have been analyzed. The selection of these OSCs was carried out from a narrow region inclined to the Galactic *Y* axis at an angle of 25°. Spectral analysis of the vertical positions and velocities of the selected clusters showed that the Radcliffe wave is associated with OSCs no older than 30 Myr. The following estimates of the Radcliffe wave characteristics were obtained for the OSCs with an average age of 5.2 Myr:  $z_{\text{max}} = 117 \pm 12 \text{ pc}$  with the wavelength  $\lambda = 4.55 \pm 0.14 \text{ kpc}$ , and the vertical velocity disturbance amplitude  $W_{\text{max}} = 4.86 \pm 0.19 \text{ km s}^{-1}$  with the wavelength  $\lambda = 1.74 \pm 0.08 \text{ kpc}$ . For the OSCs with an average age of 18.6 Myr, the estimates are as follows:  $z_{\text{max}} = 54 \pm 5 \text{ pc}$  and  $\lambda = 6.30 \pm 0.12 \text{ kpc}$ , and the vertical velocity disturbance amplitude  $W_{\text{max}} = 7.90 \pm 0.16 \text{ km s}^{-1}$  and  $\lambda = 0.83 \pm 0.11 \text{ kpc}$ . The radial motion of the Radcliffe wave away from the Galactic center has been confirmed. The velocity of such movement is 10 pc Myr<sup>-1</sup>. In our opinion, the spatial distribution of OSCs younger than 30 Myr does not contradict the hypothesis of the association of the Radcliffe wave with the impact of shock waves from supernova explosions that arose on an extended front comparable in scale to the entire wave, that is, about 2 kpc in size.

Keywords: Galaxy: kinematics and dynamics—open clusters and associations: general information