

УДК 524.45-34-17

ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ВОЛНЫ РЭДКЛИФФА ПО ВЫБОРКЕ МОЛОДЫХ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

© 2026 В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹, Н. Р. Ихсанов^{1, 2}¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук,
Санкт-Петербург, 196140 Россия²Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 18 января 2026 года; после доработки 31 марта 2026 года; принята к публикации 23 апреля 2026 года

Рассмотрена выборка из 139 молодых рассеянных звездных скоплений (РЗС), тесно связанных с волной Рэдклиффа. Моделирование их пространственного распределения и кинематики на интервале времени ± 30 млн лет от текущего момента показало наличие свойств, характерных для волны Рэдклиффа на протяжении последних 10–15 млн лет. Распределены РЗС на галактической плоскости XY в виде длинной и узкой цепочки, наклоненной к оси Y , имеющей волнообразный характер поведения вертикальных координат вплоть до 15 млн лет в прошлом, который должен сохраниться на интервале 15–20 млн лет в будущем. Новым является вывод о наличии вертикальных возмущений с амплитудой отклонения от плоскости симметрии Галактики до 200 пк на всем рассматриваемом интервале времени в прошлом, вплоть до отметки 30 млн лет назад. Этот результат ставит под сомнение возможность использования сценария, в рамках которого исходным возмущением межзвездной среды предполагается паркеровская неустойчивость галактического магнитного поля.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Волна Рэдклиффа была открыта в рамках исследования пространственного распределения большой выборки молекулярных облаков, расположенных в окрестности Солнца, на расстояниях до 3 кпк (Alves et al., 2020). Она представляет собой относительно узкую (150–200 пк) волнообразную цепочку облаков, вытянутых в линию длиной примерно 2.7 кпк в галактической плоскости. Основной особенностью этой структуры является волнообразный характер в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии галактического диска. Максимальное значение амплитуды волны в этом направлении достигается в непосредственной окрестности Солнца и составляет около 150 пк. Положение волны Рэдклиффа тесным образом связано с Местным рукавом, у которого она очерчивает ближний к Солнцу край (Bobylev et al., 2025b).

Дальнейшие исследования волны Рэдклиффа показали, что волнообразный характер поведения вертикальных координат (в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии галактического

диска) проявляется также в распределении разнообразных молодых объектов — межзвездной пыли (Edenhofer et al., 2024; Lallement et al., 2022), молекулярных облаков (Zucker et al., 2023), мазеров и радиозвезд (Bobylev et al., 2022), звезд типа Т Тельца (Li and Chen, 2022), наиболее молодых массивных ОБ-звезд (Donada and Figueras, 2021; Thulasidharan et al., 2022) и молодых РЗС (Donada and Figueras, 2021). Было установлено, что вертикальные скорости молодых РЗС в волне Рэдклиффа также образуют волну, в интервале значений ± 15 км с⁻¹ (Konietzka et al., 2024). Наконец, в той же работе было отмечено, что волна Рэдклиффа дрейфует в плоскости диска радиально в сторону галактического антицентра со скоростью около 5 км с⁻¹, а также имеет тангенциальное движение с небольшой скоростью.

До настоящего времени волна Рэдклиффа остается уникальным явлением. Предпринятые попытки обнаружить в Галактике аналогичные ей структуры (Bobylev, 2024; Martinez-Medina et al., 2025) успехом не увенчались. Одной из причин этого может быть непродолжительное время жизни такого рода образований. В частности, оценка возраста

*E-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

волны Рэдклиффа, выполненная на основе пространственного распределения РЗС, относящихся к различным возрастным группам, не превышает 30 млн лет (Bobylev et al., 2025a). Кроме того, результаты моделирования эволюции локального межзвездного газа, представленные в работе Li et al. (2024), указывают на относительно быструю эволюцию структуры волны Рэдклиффа и ее масштаба, который вследствие гравитационного воздействия Галактики удвоится всего за 45 млн лет. Это обстоятельство существенно сокращает возможности идентификации подобных образований в Галактике.

Единого мнения о происхождении волны Рэдклиффа и ее возможной связи с влиянием спиральной структуры Галактики пока не сформировано. К настоящему моменту предложен ряд возможных механизмов ее возникновения. Одной из первых была высказана гипотеза о развитии в галактическом диске неустойчивости Кельвина—Гельмгольца, возникающей благодаря разности скоростей вращения гало темной материи и диска (Fleck, 2020). В случае реализации этого сценария в различных частях диска можно ожидать наличие аналогов волны Рэдклиффа, чего пока не наблюдается.

Наиболее часто обсуждается гипотеза о воздействии на галактический диск внешнего «ударника», в качестве которого предлагается карликовая галактика — спутник Млечного Пути, массивный сгусток темной материи или шаровое скопление (Thulasidharan et al., 2022).

Также рассматривалось влияние на структуру галактического диска ударных волн (от нескольких вспышек сверхновых и звездного ветра), приведших к появлению Местного Пузыря или Северного Полярного Шпура (Konietzka et al., 2024; Marchal and Martin, 2023).

Собранные по литературным данным (Bobylev et al., 2025a) значения угла закрутки, относящиеся к рукаву Ориона (выступающего в качестве отрезка спирального рукава), лежат в интервале от -10° до -13° . Такие значения заметно отличаются от наклона цепочки молекулярных облаков -30° , по которым обнаружена волна Рэдклиффа. Таким образом, ее связь со спиральной структурой Галактики не очевидна.

До сих пор остается неясной роль галактического магнитного поля в формировании такой протяженной структуры. Реконструкция его геометрии в области волны Рэдклиффа показывает, что силовые линии ориентированы вдоль газопылевой среды, повторяя ее конфигурацию и образуя в окрестности Солнца значительный наклон к плоскости галактического диска (Papoulou et al.,

2025). Одним из возможных механизмов формирования такой структуры является развитие в галактическом диске паркеровской неустойчивости, обусловленной всплытием арок магнитного поля. По основным характеристикам, таким как длина волны и время развития, эта неустойчивость соответствует параметрам волны Рэдклиффа (Bobylev et al., 2025b). Однако вопрос о первопрочине наблюдаемого возмущения магнитного поля до сих пор не имеет однозначного ответа. Действительно, наряду с возможным развитием неустойчивости не исключена деформация его структуры из-за сильного возмущения газопылевой среды внешними факторами, перечисленными выше. Неудивительно, что возмущение среды, исходно замороженной в магнитное поле, могло привести к искажению его конфигурации. Аргументом в пользу такого сценария выступает факт формирования значительной части молодых звезд на гребне волны Рэдклиффа, то есть в области, значительно удаленной по вертикальной шкале от плоскости симметрии галактического диска. Объяснить данный факт в рамках классической картины звездообразования вследствие паркеровской неустойчивости затруднительно, так как наиболее вероятной областью формирования звезд в этом случае оказывается сама плоскость симметрии, к которой межзвездный газ стекает по мере всплытия магнитных арок (Kaplan and Pikelner, 1970).

Основанием для выбора наиболее вероятного из двух вышеописанных сценариев возмущения магнитного поля может служить исследование пространственной и кинематической эволюции волны Рэдклиффа на временном масштабе порядка десятков миллионов лет. Решение этой актуальной задачи в рамках изучения динамики молекулярных облаков осложняется нехваткой информации о собственных движениях этих компонентов волны. Для РЗС ситуация более благоприятная: в настоящий момент имеется необходимый набор измерительных данных — тригонометрические параллаксы, собственные движения, лучевые скорости и оценки возраста.

Целью настоящей работы является изучение пространственной эволюции волны Рэдклиффа. Для этого используется выборка рассеянных звездных скоплений, строятся и анализируются их галактические орбиты на интервале ± 30 млн лет от текущего момента. Особый акцент мы делаем на изучении наиболее молодых РЗС, чьи пространственные и кинематические характеристики максимально близки к свойствам молекулярных облаков, в которых они были образованы и исходные возмущения которых привели к формированию структуры волны Рэдклиффа, наблюдаемой в настоящую эпоху.

2. МЕТОД

В нашей работе используются две прямоугольные системы координат: гелиоцентрическая (x, y, z) и галактоцентрическая (X, Y, Z) . В обеих системах оси y и Y направлены в сторону галактического вращения, а z и Z — на северный полюс Галактики. Оси x и X ориентированы противоположно: x от Солнца к галактическому центру, а X — из центра на Солнце. Расстояние от Солнца до оси вращения Галактики принимается равным $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк согласно обзору Bobylev and Bajkova (2021), где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества индивидуальных оценок.

Для построения галактических орбит РЗС применяется цилиндрическая система координат (R, θ, Z) с началом в центре Галактики. Орбиты вычисляются с использованием осесимметричного гравитационного потенциала Галактики Φ , который представляет собой сумму потенциалов, создаваемых ее основными компонентами: центральным сферическим балджем (Φ_b), диском (Φ_d) и массивным сферическим гало темной материи (Φ_h). Балдж описывается пламмеровским потенциалом (Plummer, 1911), диск — потенциалом по модели Miyamoto and Nagai (1975), а вклад гало учитывается по модели Navarro et al. (1997). Таким образом, полный потенциал задается выражением: $\Phi = \Phi_b + \Phi_d + \Phi_h$. Значения параметров используемой модели потенциала даны в работе Bajkova and Bobylev (2016), где она обозначена как «модель III».

Галактические орбиты РЗС строятся в системе координат, связанной с местным стандартом покоя. Поэтому из исходных скоростей исключается пекулярная скорость Солнца относительно местного стандарта покоя со значениями $(U, V, W)_\odot = (11.0, 12.0, 7.2)$ км с⁻¹ из работы Schönrich et al. (2010). Учитывается также высота Солнца над плоскостью симметрии Галактики $h_\odot = 16$ пк (Bajkova and Bobylev, 2016).

Отметим, что орбиты РЗС могут быть представлены как в неподвижной системе координат (X, Y, Z) , так и во вращающейся вместе с местным стандартом покоя.

3. ДАННЫЕ

В настоящей работе используются характеристики РЗС из улучшенной версии каталога Hunt and Reffert (2024), которая включает 5647 РЗС и 1309 движущихся групп. Причем 3530 РЗС и 539 движущихся групп имеют высокие индексы качества согласно авторам каталога; большинство из них расположены на гелиоцентрических расстояниях менее 4 кпк. В каталоге указаны средние

значения тригонометрических параллаксов РЗС, собственных движений и лучевых скоростей, вычисленные по данным Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023). Также приведены оценки возраста скоплений, полученные этими авторами методом изохрон.

Публикация Hunt and Reffert (2024) главным образом посвящена динамическим оценкам РЗС, таким как их массы, радиусы, а также изучению характера связанности. Подробное описание получения средних значений параллаксов, собственных движений, лучевых скоростей и возрастов дано в работе Hunt and Reffert (2023). Интересно отметить, что полученные этими авторами относительные погрешности средних значений параллаксов и собственных движений РЗС малы и не превышают 10–15%. Случайные отклонения средних значений лучевых скоростей РЗС для значительной части каталога не превышают 10 км с⁻¹, хотя имеются скопления с существенно большим уровнем таких ошибок. Оценки возрастов РЗС получены с относительной неопределенностью 30–50%.

Отбор РЗС, вероятно связанных с волной Рэдклиффа, был нами произведен в зоне, ограниченной двумя линиями на плоскости xy :

$$\begin{aligned} x &= y \tan \beta - 0.65, \\ x &= y \tan \beta + 0.05, \end{aligned} \quad (1)$$

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:

$$y' = y \cos \beta + (x - x_1) \sin \beta, \quad (2)$$

где $x_1 = -0.28$ кпк.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа были взяты РЗС моложе 10 млн лет, с индексом «о» (open cluster) в каталоге Hunt and Reffert (2024), имеющие значения параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей. После отбора согласно граничным условиям (1) в выборку вошли 139 РЗС со средним возрастом 6.2 млн лет.

На рис. 1а дано распределение отобранных 139 молодых РЗС в проекции на галактическую плоскость XU в настоящий момент времени. Из рисунка видно, что зона отбора достаточно широкая, но большинство РЗС вытянуты «в струну». Такая структура очень напоминает распределение молекулярных облаков, по которым Alves et al. (2020) обнаружили волну Рэдклиффа. Это позволяет предположить, что кинематические свойства выбранных РЗС унаследованы от родительских

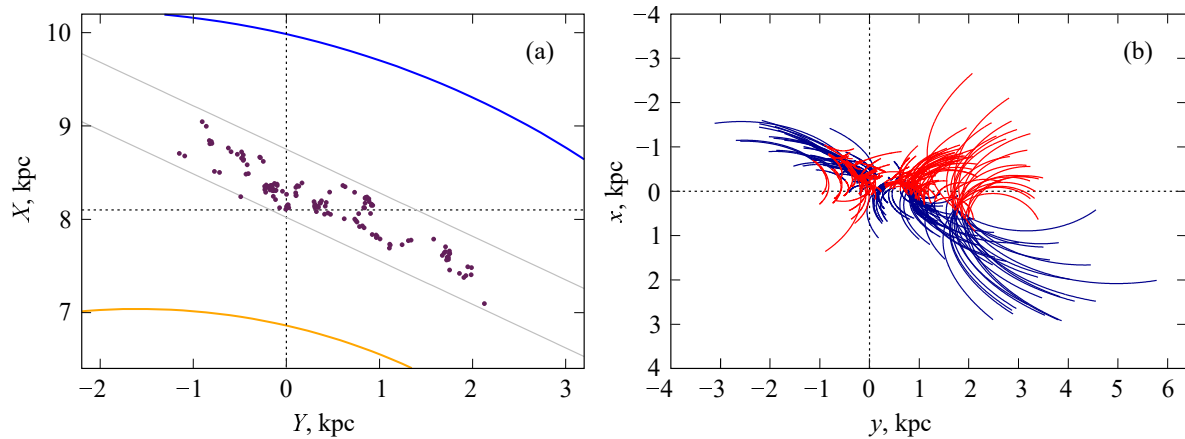


Рис. 1. Распределение 139 РЗС моложе 10 млн лет в проекции на галактическую плоскость XY (а): отрезки ближайших к Солнцу спиральных рукавов указаны синей (Персея) и оранжевой (Киля–Стрельца) линиями; серыми линиями обозначены границы области отбора. Траектории 139 РЗС в подвижной системе отсчета (относительно местного стандарта покоя), построенные назад по времени на интервале 30 млн лет, — красные линии, а вперед по времени на 30 млн лет — темно-синие линии (б).

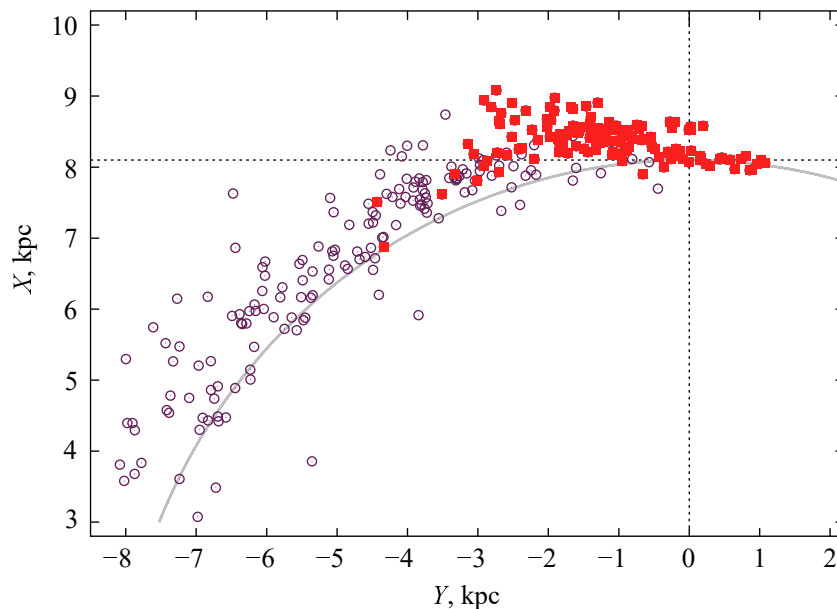


Рис. 2. Места рождения РЗС возрастом менее 50 млн лет отмечены кружками; РЗС моложе 10 млн лет — красными квадратами; Солнечный круг показан серой линией.

молекулярных облаков, моделирование кинематики которых позволяет получить достоверную информацию о пространственной эволюции волны Рэдклиффа.

На рис. 1b представлены траектории 139 молодых РЗС в подвижной системе отсчета, построенные для временного интервала ± 30 млн лет, который охватывает также этап эволюции родительских молекулярных облаков до момента звездообразования.

В области, показанной на рис. 1а, были отображены 337 РЗС, имеющих возраст менее 50 млн лет. Места их рождения, определенные путем постро-

ения галактических орбит назад на время, равное возрасту скоплений, показаны на рис. 2; объекты моложе 10 млн лет отмечены на нем красными квадратами. Как видно из рис. 1а и 2, большинство таких молодых скоплений в настоящий момент находятся вблизи мест своего рождения и в целом сохраняют структуру, наклоненную к оси Y . Таким образом, данная выборка РЗС является достаточно однородной в кинематическом отношении, хотя в ней имеется небольшая фракция «бегунов».

На рис. 3 приведены зависимости вертикальных координат z и скоростей W для 139 молодых РЗС от координаты y' . Распределение точек на рис. 3а

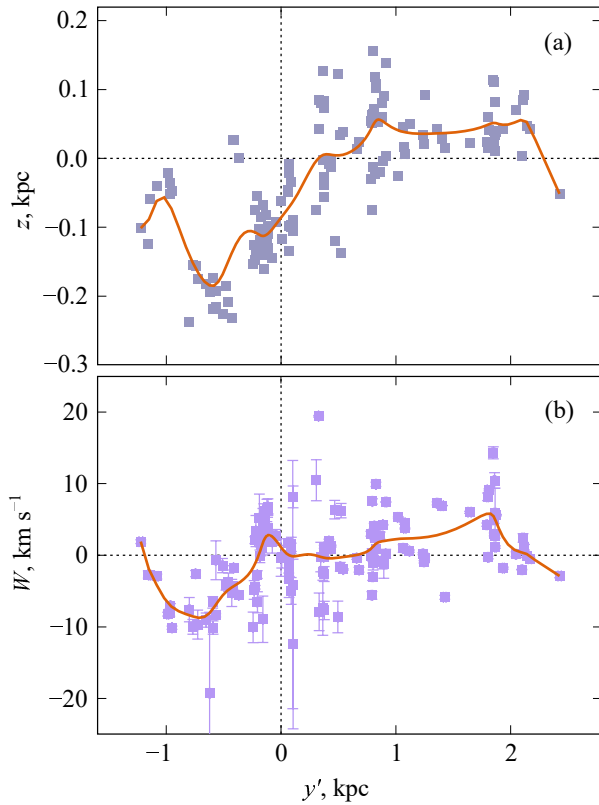


Рис. 3. Наблюдаемые в настоящее время z -координаты выборки РЗС моложе 10 млн лет (а) и их вертикальные скорости W в зависимости от координаты y' (б). Оранжевые кривые — усредненные значения (линии построены в программе **Gnuplot**).

имеет вид волны, что согласуется с результатами анализа РЗС, полученными другими авторами (например, Bobylev et al., 2025a; Donada and Figueras, 2021; Konietzka et al., 2024). Вертикальные скорости на рис. 3b также демонстрируют волнообразный характер.

На рис. 4 показано положение 139 молодых РЗС в проекции на галактическую плоскость XU в разные моменты времени в прошлом во вращающейся системе координат относительно местного стандарта покоя.

На рис. 5 для отобранных РЗС представлена зависимость их вертикальных координат z от y' в разные моменты времени в прошлом. Панели (а), (с), (е), (г), (и), (к) охватывают все 139 объектов и дополнены кривыми усредненных значений. Существенные отклонения относительно этих кривых (отскоки) отмечены на панелях (а) и (е) зелеными кружками. Всего обнаружено девять таких отскакивающих РЗС. На панелях (б), (д), (ф), (h), (j), (l) приведены те же зависимости для 130 РЗС без учета отскоков. Из сравнения кривых на панелях (а) и (б), (с) и (д) и в особенности на (е) и (ф), видно устранение

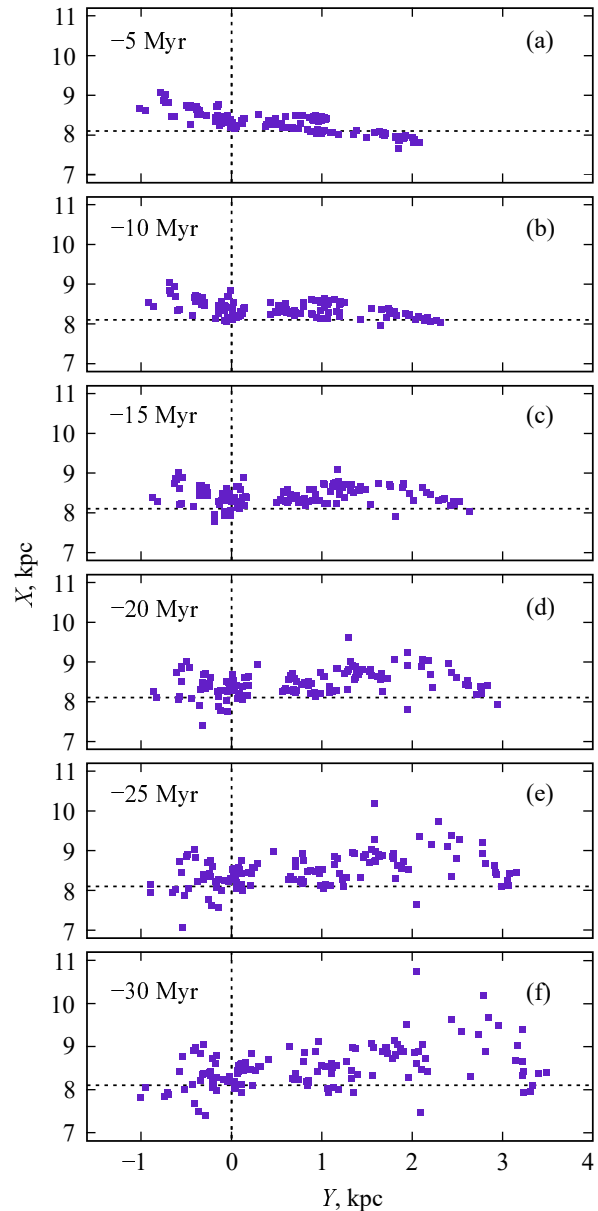


Рис. 4. Распределение выборки из 139 РЗС моложе 10 млн лет в проекции на галактическую плоскость XU в разные моменты времени в прошлом; местный стандарт покоя находится в точке с координатами $(X, Y) = (8.1, 0)$ кпк.

локальных отклонений от достаточно плавных линий.

На рис. 6 представлено распределение отобранных 139 молодых РЗС в проекции на галактическую плоскость XU относительно местного стандарта покоя в будущем. Причем здесь для экономии места даны только четыре временных среза, так как общий тренд очевиден.

На рис. 7 показаны вертикальные координаты 139 молодых РЗС в зависимости от расстояния y' в разные моменты времени в будущем.

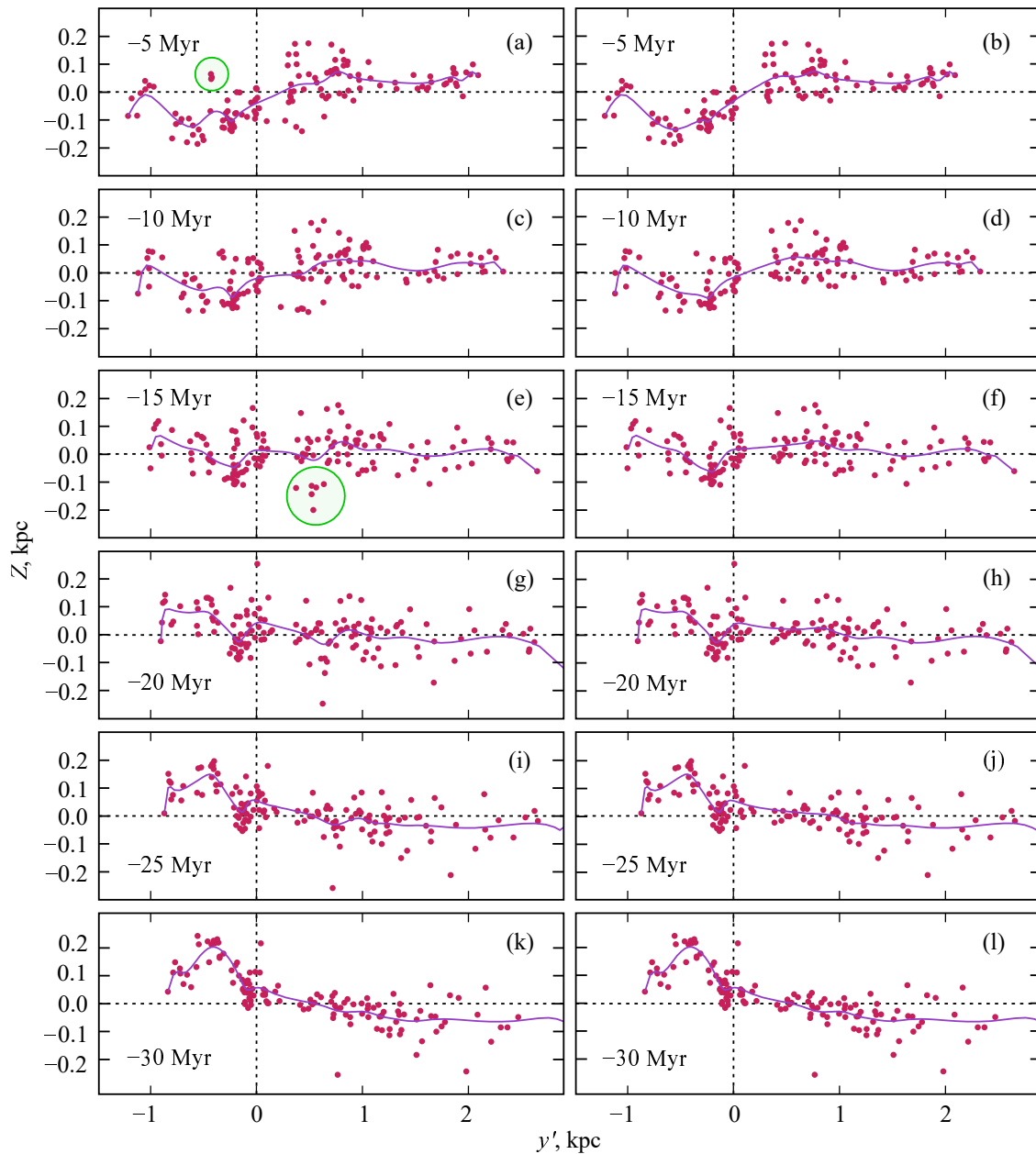


Рис. 5. На левых панелях представлены координаты Z выборки 139 РЗС моложе 10 млн лет в зависимости от расстояния y' в разные моменты времени в прошлом. На правых панелях — зависимость $Z(y')$ для 130 РЗС после исключения отскоков, которые отмечены зелеными кружками на панелях (a) и (e).

На рис. 8 показана зависимость модуля координат z от времени рождения для двух групп РЗС из одной зоны отбора: 139 объектов с возрастом менее 10 млн лет и более многочисленной выборки с возрастом моложе 50 млн лет. Рисунок построен, в частности, для проверки возможного влияния паркеровской неустойчивости галактического магнитного поля на формирования волнообразных неоднородностей в диске. Одним из предсказаний такого сценария является преимущественная локализация областей звездообразования вблизи

плоскости симметрии галактического диска. Как видно из рис. 8, области рождения 139 РЗС моложе 10 млн лет, составляющие волну Рэдклиффа, располагаются, напротив, на существенном удалении от этой плоскости, вдали от объектов, не принадлежащих этой структуре. Это указывает на то, что либо паркеровская неустойчивость не является основной причиной возмущения галактического магнитного поля в волне Рэдклиффа, либо всплывающее магнитное поле имеет более сложную геометрию, исключающую возможность стекания межзвездного газа вдоль силовых линий

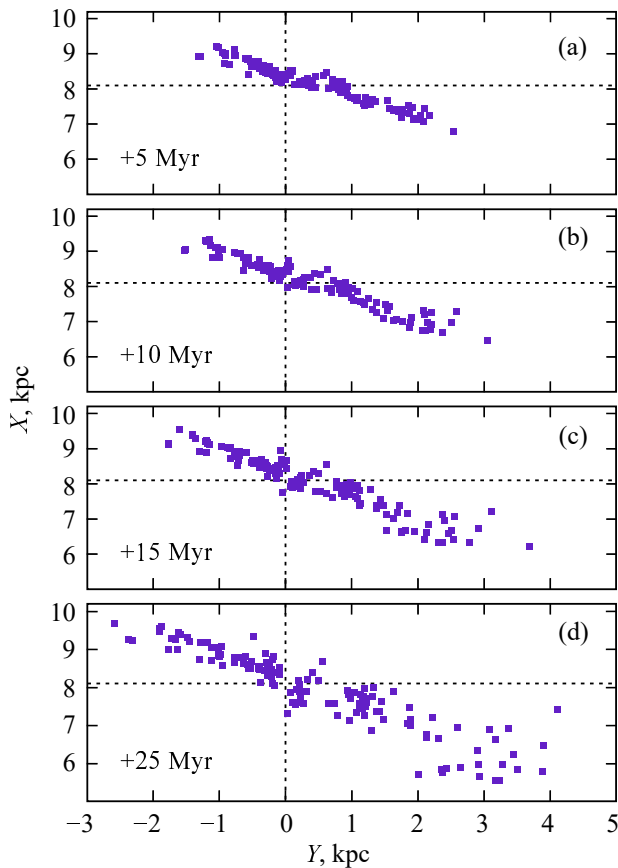


Рис. 6. Распределение выборки из 139 РЗС моложе 10 млн лет в проекции на галактическую плоскость XY в разные моменты времени в будущем; местный стандарт покоя находится в точке с координатами $(X, Y) = (8.1, 0)$ кпк.

к плоскости симметрии Галактики и образования в этих областях исходных очагов звездообразования.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемая выборка из 139 РЗС со средним возрастом 6.2 млн лет демонстрирует главные свойства, характерные для волны Рэдклиффа, на протяжении последних 10–15 млн лет. Во-первых, на этом временном отрезке выборка имеет пространственное распределение в виде достаточно длинной и узкой цепочки, расположенной под наклоном к оси Y . Во-вторых, она имеет волнообразный характер поведения вертикальных координат вплоть до 15 млн лет в прошлом. Другими словами, родительские облака, из которых образовались в свое время эти РЗС, на значительном интервале времени демонстрируют свойства, наблюдаемые в настоящее время у цепочки молекулярных облаков, по которым и была впервые обнаружена волна Рэдклиффа. Интересно также отметить, что волнообразный характер поведения вертикальных координат этой выборки должен сохраниться на

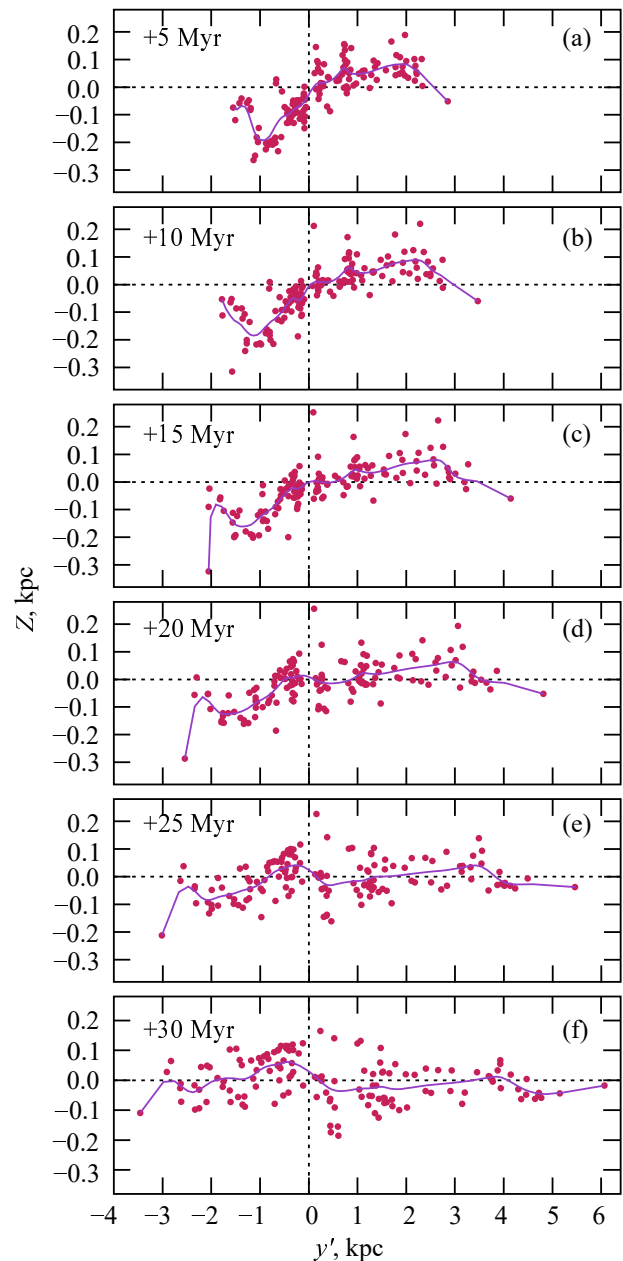


Рис. 7. Координаты Z выборки из 139 РЗС моложе 10 млн лет в зависимости от расстояния y' в разные моменты времени в будущем.

интервале 15–20 млн лет в будущем. Это означает, что имеется пока неизвестный механизм, поддерживающий наблюдаемые у волны Рэдклиффа вертикальные колебания на интервале времени около 30 млн лет (± 15 млн лет от настоящего момента).

Мы нашли следующие эффекты:

- 1) значительное растяжение 139 РЗС со временем в будущем;
- 2) дальнейшее разрушение этой структуры под воздействием дифференциального вращения

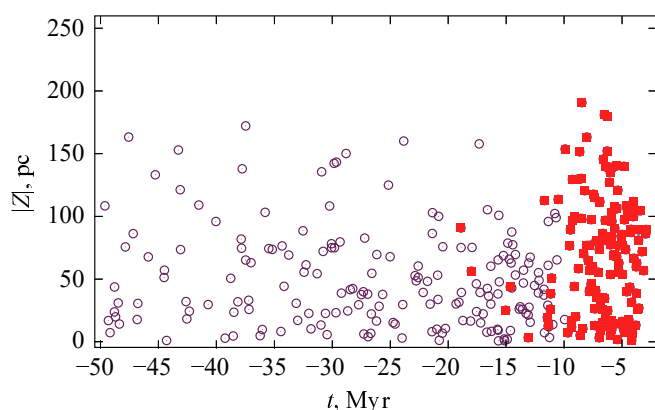


Рис. 8. Квадратами обозначены модули Z выборки из 139 РЗС моложе 10 млн лет, кружками — РЗС моложе 30 млн лет в зависимости от времени их рождения.

Галактики и галактического прилива через 20–25 млн лет.

Эти выводы хорошо согласуются с моделированием кинематики газовых облаков, выполненным в работе Li et al. (2024). Отметим, что цепочка наших РЗС и на плоскости XU имеет волнообразный характер как в прошлом (рис. 4a, b, c), так и в будущем (рис. 6a, b).

Наиболее интересным из обнаруженных новых эффектов является наличие значительных по амплитуде вертикальных возмущений на всем протяжении предыдущей эпохи эволюции волны Рэдклиффа длительностью до 30 млн лет (см. рис. 5). Амплитуда таких возмущений достигает $z \sim 200$ пк, и общий вид структуры значительно отличается от характерной для волны Рэдклиффа (рис. 5b, d, f).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием данных из каталога рассеянных звездных скоплений Hunt and Reffert (2024) в настоящей работе была сформирована выборка потенциально связанных с волной Рэдклиффа рассеянных звездных скоплений возрастом не старше 10 млн лет из зоны отбора, наклоненной к галактической оси Y на угол 25° . В выборку вошли 139 скоплений со средним возрастом 6.2 млн лет.

Выполнено моделирование их пространственного распределения и кинематики на интервале времени ± 30 млн лет. Установлено, что отобранные нами для анализа РЗС демонстрируют главные свойства, характерные для волны Рэдклиффа, на протяжении последних 10–15 млн лет. В частности, они распределены на галактической плоскости XU в виде длинной и узкой волнообразной цепочки, имеющей выраженный наклон к оси y и значительную амплитуду вертикальных отклонений. Проведенное моделирование показывает, что такой

характер поведения их z -координат сохранится на интервале 15–20 млн лет в будущем.

Принципиально новым результатом является существенная амплитуда (вплоть до 200 пк от плоскости симметрии Галактики) исходных вертикальных возмущений компонентов волны Рэдклиффа, на всем протяжении ее эволюции в течение последних 30 млн лет. Область образования значительной части молодых звезд, принадлежащих этой структуре, изначально располагалась далеко от плоскости симметрии галактического диска по вертикальной оси. Сценарий, основанный на исходном возмущении межзвездной среды паркерской неустойчивостью магнитного поля, в свете этого результата оказывается неэффективным или нуждается в модернизации.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института организации. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Alves, C. Zucker, A. A. Goodman, et al., *Nature* **578** (7794), 237 (2020). DOI:10.1038/s41586-019-1874-z
2. A. T. Bajkova and V. V. Bobylev, *Astronomy Letters* **42** (9), 567 (2016). DOI:10.1134/S1063773716090012
3. V. V. Bobylev, *Astronomy Letters* **50** (12), 796 (2024). DOI:10.1134/S1063773725700100
4. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Reports* **65** (6), 498 (2021). DOI:10.1134/S1063772921070015
5. V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, and Y. N. Mishurov, *Astronomy Letters* **48** (8), 434 (2022). DOI:10.1134/S1063773722070027
6. V. V. Bobylev, N. R. Ikhsanov, and A. T. Bajkova, *Astrophysical Bulletin* **80** (2), 181 (2025a). DOI:10.1134/S1990341325600024

7. V. V. Bobylev, N. R. Ikhsanov, and A. T. Bajkova, *Astronomy Reports* **69** (9), 786 (2025b). DOI:10.1134/S1063772925702063
8. J. Donada and F. Figueras, arXiv e-prints 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
11. E. L. Hunt and S. Reffert, *Astron. and Astrophys.* **673**, id. A114 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346285
12. E. L. Hunt and S. Reffert, *Astron. and Astrophys.* **686**, id. A42 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202348662
13. S. A. Kaplan and S. B. Pikelner, *The interstellar medium* (Cambridge: Harvard University Press, 1970).
14. R. Konietzka, A. A. Goodman, C. Zucker, et al., *Nature* **628** (8006), 62 (2024). DOI:10.1038/s41586-024-07127-3
15. 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
16. G.-X. Li and B.-Q. Chen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **517** (1), L102 (2022). DOI:10.1093/mnrasl/slac050
17. 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
18. A. Marchal and P. G. Martin, *Astrophys. J.* **942** (2), id. 70 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/aca4d2
19. L. Martinez-Medina, E. Poggio, and E. Moreno-Hilario, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **542** (1), L94 (2025). DOI:10.1093/mnras/slaf075
20. M. Miyamoto and R. Nagai, *Hubl. Astron. Soc. Japan* **27** (4), 533 (1975). DOI:10.1093/pasj/27.4.533
21. J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **490** (2), 493 (1997). DOI:10.1086/304888
22. G. V. Panopoulou, C. Zucker, D. Clemens, et al., *Astron. and Astrophys.* **694**, id. A97 (2025). DOI:10.1051/0004-6361/202450991
23. H. C. Plummer, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **71**, 460 (1911). DOI:10.1093/mnras/71.5.460
24. R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **403** (4), 1829 (2010). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.16253.x
25. L. Thulasidharan, E. D’Onghia, E. Poggio, et al., *Astron. and Astrophys.* **660**, id. L12 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142899
26. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
27. C. Zucker, J. Alves, A. Goodman, et al., *ASP Conf. Ser.*, **534**, 43 (2023).

Study of Spatial Evolution of Radcliffe Wave Based on Sample of Young Open Star Clusters

V. V. Bobylev¹, A. T. Bajkova¹, and N. R. Ikhsanov^{1,2}

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

²Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

We considered a sample of 139 young open star clusters closely associated with the Radcliffe wave. Modeling their spatial distribution and kinematics over a time interval of 30 Myr from the current moment revealed properties characteristic of the Radcliffe wave over the past 10–15 Myr. The open clusters are distributed on the Galactic *XY* plane as a long, narrow chain tilted relative to the *Y*-axis. This chain exhibits a wave-like behavior in its vertical coordinates stretching back 15 Myr into the past, which is expected to persist for 15–20 Myr into the future. A new finding is the presence of vertical perturbations with an amplitude of deviation from the galactic symmetry plane of up to 200 pc over the entire time interval considered in the past, up to –30 Myr. This result challenges the validity of a scenario assuming that the Parker instability of the Galactic magnetic field is the initial perturbation of the interstellar medium.

Keywords: *Galaxy: kinematics and dynamics, open clusters and associations: general information*