

УДК: 524.6—337

МОДЕЛЬ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГАЛАКТИКИ

Р. Р. АНДРЕАСЯН, А. Н. МАКАРОВ

Поступила 6 мая 1987

Принята к печати 20 декабря 1987

На основе фарадеевского вращения плоскости поляризации радионизлучения пульсаров и внегалактических радиоисточников построена модель двухкомпонентного магнитного поля нашей Галактики. Первый (плоский) компонент магнитного поля параллелен спиральным рукавам Галактики, причем в соседних спиральных рукавах поля имеют противоположные направления. Второй компонент магнитного поля (поле «га-ло») простирается на большие расстояния от плоскости Галактики и охватывает спиральные рукава. Магнитное поле этой области имеет противоположные направления в северном и южном полушариях Галактики, причем в южном полушарии это направление близко к направлению магнитного поля местного рукава Галактики.

1. *Введение.* Магнитное поле Галактики изучается разными методами. Одним из лучших и часто применяемых является метод, основанный на определении мер фарадеевских вращений плоскости поляризации (E -вектора) излучения радиоисточников,

$$RM = 8.1 \cdot 10^3 \int_L N_e B_L dL.$$

Здесь N_e — число электронов (в см^3) в среде, L — длина пути, пройденная излучением в парсеках, B_L — продольная составляющая магнитного поля в разных направлениях, выраженная в гауссах. Знак меры вращения зависит от направления магнитного поля, причем знак «плюс» указывает на то, что поле направлено к наблюдателю. Значение RM в данном направлении обусловлено составляющими магнитных полей различных областей, находящихся на луче зрения между Солнцем и данным радиоисточником. Метод RM дает возможность изучать магнитное поле вблизи (на расстояниях $\sim 1.5 \div 2$ кпк) Солнца, поскольку обычно принимается, что магнитное поле локализовано у плоскости Галактики в слое с толщиной $h \sim 400$ пк, а используемые внегалактические источники находятся на широтах $|b| > 10^\circ - 15^\circ$ [1—5]. Этим методом было показано, что магнитное

поле в южном полушарии Галактики имеет направление $(l, b) = (90^\circ, 10^\circ)$, примерно совпадающее с направлением локального спирального рукава, тогда как для направления магнитного поля северного полушария у разных авторов приводятся противоречивые значения.

В последнее время показано, что в некоторых спиральных галактиках (M 31, NGC 253, M 33, IC 342, M 81, NGC 6946) магнитные поля имеют круговую или бисимметричную форму [6—8] и, как правило, локализованы в спиральных рукавах. Подобные результаты теоретического и наблюдательного характера были получены также для нашей Галактики [6—10, 28]. Однако не исключена возможность образования некоторой части фарадеевского вращения в областях, достаточно удаленных от плоскостей симметрии галактик. Для нашей Галактики это следует из галактического нетеплового фонового радиоизлучения [11], распределения первичных космических лучей в Галактике [12], а также найденной в работе [1] экспоненциальной зависимости напряженности магнитного поля от расстояния до плоскости Галактики. Далеко простирающиеся магнитные поля наблюдаются также в радиогалактиках, которые обычно отождествляются с массивными эллиптическими галактиками. Наличие крупномасштабного дипольного магнитного поля галактик следует из адронной теории Мурадяна [13, 14], а также из теории турбулентного динамо для сферически симметричных объектов [15].

Настоящая работа посвящена изучению магнитного поля в спиральных рукавах, а также вдали от плоскости Галактики на основе мер вращений пульсаров и внегалактических радиоисточников.

2. *Магнитные поля в спиральных рукавах Галактики.* При изучении магнитных полей спиральных рукавов Галактики наиболее удобным является использование низкоширотных галактических объектов, что обусловлено малой полутолщиной рукавов ($h \sim 300 \div 400$ пк). В работе [2] для изучения магнитного поля у плоскости Галактики были использованы неотожествленные радиоисточники с $|RM| \geq 200$ рад/м². Было показано, что эти объекты, в основном, галактические, а направление магнитного поля совпало с направлениями, полученными другими методами для местного спирального рукава. Поскольку данные объекты, в основном, наблюдаются на галактических широтах $|b| \sim 5^\circ - 15^\circ$, то можно считать, что большей частью это близкие к Солнцу радиоисточники ($r \sim 1$ кпк) и, следовательно, пригодны только для изучения магнитного поля местного спирального рукава.

Для изучения магнитных полей других спиральных рукавов более пригодны данные о пульсарах. Пульсары находятся на расстояниях до нескольких кпк и даже ~ 10 кпк. Кроме того, они, в основном, близкие к плоскости Галактики объекты. Расстояний до пульсаров достаточно на-

дежно определяются по их мерам дисперсий DM , поэтому, если нам известно распределение спиральных рукавов в Галактике, мы можем с достаточной уверенностью определить, в каком из спиральных рукавов находится данный пульсар и через какие области проходит достигающее нас излучение. В работе [16] приведена карта распределения спиральных рукавов Галактики по галактической долготе l и расстоянию от Солнца r , полученная с использованием галактических Н II-областей (рис. 1). Отметим, что такая картина расчленения спиральных рукавов в настоящее время является общепринятой. В этой же работе показано, что местный, так называемый Орионов рукав, вовсе не является отдельным спиральным рукавом, а, вероятно, является ответвлением от спирального рукава Персея или Стрельца. Солнце находится на краю ответвления со стороны центра Галактики.

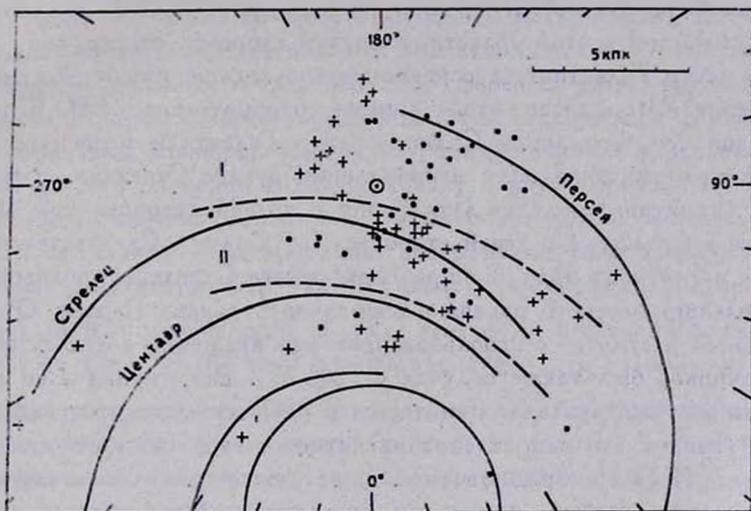


Рис. 1. Распределение пульсаров в плоскости Галактики. Пульсар обозначен (+ — если мера вращения положительная, • — если RM отрицательная).

В настоящей работе использованы данные для 185 пульсаров, взятые из работ [17, 18]. На карту расположения спиральных рукавов (рис. 1) нанесены координаты пульсаров, обозначенные точками, если меры вращений объектов отрицательны, и крестиками, если RM положительны (подобная картина построена в [9] с использованием данных для 66 пульсаров). Поскольку нас, в первую очередь, интересуют магнитные поля других рукавов, а также, чтобы не загромождать рисунок, на карту были нанесены только те пульсары, у которых $r = d \cos b \geq 1$ кпк (d — расстояние пульсара от Солнца). Из рассмотрения были исключены также все те пульсары, для которых $|h| = d \sin |b| > 400$ пк, поскольку они находят-

ся вне области спиральных рукавов. Кроме того, были исключены пульсары с $|RM| \leq 2$ рад/м², из-за больших относительных ошибок определения мер вращений (см. [17]). Изучению магнитного поля местного рукава с использованием всех известных RM пульсаров будет посвящена отдельная работа.

На рис. 1, для построения которого использованы данные для оставшихся после перечисленных исключений пульсаров, четко выделяются две области с противоположно направленными магнитными полями. Это область I, совпадающая со спиральным рукавом Персея и местным рукавом, и область II — область спирального рукава Стрельца. Как и ожидалось (см. [1—3]), в области I магнитное поле направлено примерно от $l \approx 270^\circ$ к $l \approx 90^\circ$, поскольку при $0^\circ \leq l \leq 180^\circ$ значения RM , в основном, отрицательны, а при $180^\circ < l < 360^\circ$ — положительны. В области же спирального рукава Стрельца магнитное поле направлено к $l \approx 270^\circ$, так как в отличие от области I в этой области, в правой стороне от прямой линии Солнце — центр Галактики, в основном все пульсары имеют положительные значения RM , а левее этой линии — отрицательные RM . Вероятно, это вызвано тем, что линия Солнце — центр Галактики перпендикулярна направлению магнитного поля в спиральном рукаве Стрельца, и поэтому проекция магнитного поля на луч зрения с правой стороны этой области направлена к Солнцу, а с левой стороны — от Солнца. Следовательно, направление магнитного поля в спиральном рукаве Стрельца противоположно направлению местного рукава и спирального рукава Персея. Отметим, что подобный результат с использованием мер вращений внегалактических радиосточников был также получен в [26, 27]. Если принять во внимание то, что местный рукав, как считается в [16], является ответвлением от других рукавов и что направления магнитных полей местного и спирального рукава Персея совпадают (последнее нуждается в более детальном изучении, которому будет посвящена отдельная работа), можно местный Орионов рукав рассматривать как ответвление спирального рукава Персея.

Результаты, полученные в настоящем разделе, соответствуют бисимметричной модели (упомянутой во введении), в которой направления магнитных полей соседних спиральных рукавов противоположны друг другу. Данные результаты хорошо согласуются с выводами, полученными нами в работе [9].

3. *Распределение мер фарадеевского вращения радиосточников по галактическим координатам.* Как было сказано во введении, при изучении магнитного поля Галактики обычно привлекается плоско-параллельная модель [1—5]. В работах [1—3] показано, что в этой модели значения RM_i для каждого объекта можно линейным образом выразить параметрами (l_0, b_0) направления поля и параметром K , характеризующим мощность

слоя магнитоионного вещества. Задача сводится к нахождению этих параметров обычным методом наименьших квадратов. Однако этим методом можно найти лишь средние значения параметров для всей изучаемой области, усредняя все локальные поля (если, конечно, таковые имеются).

В настоящем разделе мы хотим получить общую картину магнитного поля Галактики на основе данных RM для 792 радиоисточников, взятых в основном (703 объекта) из работы [19]. Данные для остальных 89 радиоисточников взяты из работ [10, 20, 21, 25]. Если нанести все данные на карту с галактическими координатами (l, b) , то будет очень трудно получить представление о распределении RM . Это связано с тем, что близкие друг к другу по координатам радиоисточники из-за разных причин (флуктуация поля, собственные поля радиоисточников, магнитное поле Метагалактики) иногда имеют сильно отличающиеся значения RM (значения RM близких объектов часто отличаются даже знаком). Поэтому для построения карты распределения RM мы используем средние значения мер вращений в разных точках небесной сферы. С целью нахождения оптимального радиуса области усреднения были рассмотрены разные по величине площадки. Наконец, в качестве радиуса области усреднения были выбраны области размером в 15° , поскольку в круг радиусом 15° попадает достаточное количество объектов (10—20 объектов) и зависимость мер вращений от галактических координат в них не так сильно сказывается на полученных результатах (см. [22]). Таким образом, были получены средние значения \overline{RM} с дисперсией σ_{RM} для всех точек небесной сферы, отстоящих друг от друга на 10° по l и b координатам. Для улучшения полученных картин распределения средних значений \overline{RM} , были наложены некоторые ограничения на используемые в статистике данные. Так, при численных расчетах были наложены некоторые ограничения на красное смещение (z), поскольку можно было ожидать, что влияние метагалактического магнитного поля усиливается с увеличением z используемых радиоисточников. Из статистики при разных расчетах исключались радиоисточники с $z \geq 0.1$, $z \geq 0.2$, $z \geq 0.5$, так как в работе [3] показано, что влияние метагалактического поля на RM при $z \approx 1$ уже сравнимо с влиянием галактического поля на умеренных широтах. Оказалось, что картина распределения слабо меняется при ограничениях на z . Вероятно, это можно объяснить малочисленностью радиоисточников с большими красными смещениями (240 объектов с $z \geq 0.2$) в используемом нами списке.

Выяснилось, что полученные результаты более чувствительны к ограничениям, накладываемым на значения RM . Однако тут нужна некоторая осторожность, чтобы не потерять полезную информацию. Дело в том, что в случае плоской модели магнитного поля на умеренных галактических широтах ожидается $RM \sim 20\text{--}40$ рад/м², и естественно ограничиться рас-

смотрением радионсточников с $|RM| \leq 100$ рад/м² (предполагается, что большие значения RM на широтах $|b| \geq 15^\circ$ обусловлены собственными магнитными полями радионсточников [1—3]). У плоскости же Галактики значения RM могут достигать нескольких сотен рад/м², что справедливо и для дисперсий ($\sigma_{RM} \sim 300\text{—}400$ рад/м²). Поэтому в области $|b| \leq 15^\circ$ необходимо учитывать также данные $|RM| > 100$ рад/м². Для этой области в качестве ограничения на RM можно взять $|RM| \leq A\sigma_{RM}$, где постоянная A — некоторый параметр, который можно менять в ходе вычислений. Таким способом были проведены расчеты при разных ограничениях на величины RM_i и z_i радионсточников и построены карты распределения средних значений \overline{RM} по галактическим координатам. На рис. 2 приведена одна из таких карт. Надо отметить, что карты, полученные при других ограничениях, в общих чертах сходны с картой рис. 2. В работах [10, 22] приведена подбная карта, полученная при использовании меньшего числа данных. Из рис. 2 и рис. 3 из [10], видно, что обе карты распределения RM качественно схожи. Так, по рисункам можно заключить, что поле южного полушария $b < 0^\circ$ направлено приблизительно к $l \sim 90^\circ$, поскольку в области $0^\circ \leq l \leq 180^\circ$ значения \overline{RM} отрицательны, а в области $180^\circ < l < 360^\circ$ — положительны. Для северного полушария ($b > 0^\circ$) на картах выделяются две области с противоположно направленными магнитными полями. Однако между этими рисунками существует, на наш взгляд, существенное различие: это различие в размерах упомянутых областей. На рис. 3, полученном в [10], область II (где магнитное поле имеет направление, противоположное направлению южного полушария Галактики) меньших размеров ($0^\circ \leq l \leq 50^\circ$ и $270^\circ \leq l < 360^\circ$), чем область I ($50^\circ < l < 270^\circ$). Направление магнитного поля в области I совпадает с направлением поля южного полушария. Поэтому наличие сравнительно малой области II в работах [10, 12] объясняется северным полярным шпуром, вклад которого в меру вращения радионсточников оценивается в ~ 5 рад/м² [23]. Область II, в которой направление магнитного поля противоположно полю южного полушария, по нашим расчетам (рис. 2) имеет большие размеры ($0^\circ \leq l \leq 110^\circ$ и $270^\circ \leq l < 360^\circ$), чем область I. Среднее значение мер вращения в области II составляет $\sim 20\text{—}30$ рад/м². Кроме того, в работах [1, 2] приводятся доводы в пользу того, что в северном полушарии, начиная с некоторого расстояния от плоскости Галактики, магнитное поле меняет свое направление на противоположное. Имея в виду вышесказанное, нам кажется, что наличие области II на рис. 2 нельзя объяснить локальным Шпурсм.

Для объяснения распределения средних значений \overline{RM} (рис. 2) по галактическим координатам, в настоящей работе предлагается новая модель магнитного поля Галактики. По этой модели предполагается существова-

ние двух областей магнитного поля в Галактике: область галактических спиральных рукавов (плоская система, изученная в предыдущем разделе) и с другой стороны обширная область, охватывающая спиральные рукава и распространяющаяся на значительное расстояние от плоскости Галактики

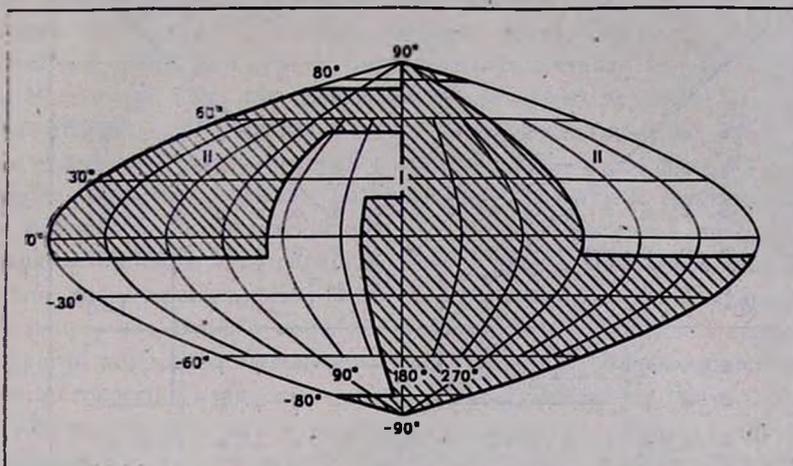


Рис. 2. Распределение знаков мер вращений внегалактических радиоисточников. Область положительных значений RM заштрихована.

(назовем ее «гало»). О возможном существовании магнитного поля области «гало» было отмечено во введении настоящей статьи. На рис. 3 схематично показано сечение местного спирального рукава Ориона. Напомним, что Солнце находится на внутреннем крае этого рукава [16, 23, 24]. Предполагается, что магнитное поле в этом рукаве имеет направление $l \sim 90^\circ$, совпадающее с направлением поля южного полушария Галактики и области I рис. 2. На рис. 3 также приведена область, простирающаяся в обе стороны от плоскости Галактики, названная нами «гало» и имеющая собственное крупномасштабное магнитное поле. Магнитное поле в северном и южном полушариях области «гало» имеет противоположные направления, причем в южном полушарии направление поля «гало» близко к направлению поля локального спирального рукава.

В рамках предложенной модели легко объяснить наличие в северном полушарии двух областей с противоположно направленными магнитными полями (рис. 2). Действительно, поскольку Солнце находится на внутреннем крае рукава, то в направлениях области I излучение радиоисточников проходит через среду местного рукава и «гало», и если вклад в RM магнитным полем рукава больше, чем вклад «гало», то усредненное магнитное поле будет иметь то же направление, что и поле рукава. В области же II излучение радиоисточников проходит только через «гало» северного полушария, и мы наблюдаем магнитное поле, имеющее направление, противо-

положное направлению местного рукава. В южном же полушарии Галактики магнитные поля «гало» и местного рукава имеют почти одинаковые направления $l \sim 90^\circ$, чем и объясняется распределение RM при $b < 0^\circ$.

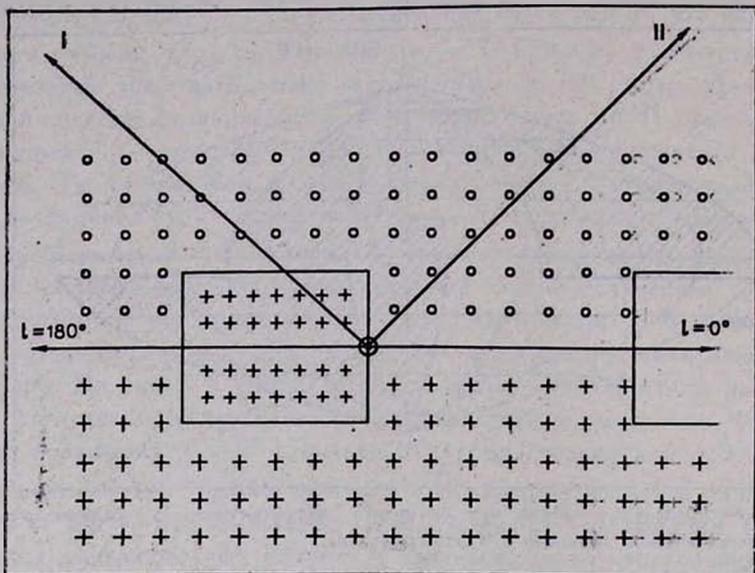


Рис. 3. Сечение местного спирального рукава Ориона. Обозначения: \odot — Солнце, кружки — область «гало» северного полушария, где магнитное поле направлено к картинной плоскости; крестики — область «гало» южного полушария и местного рукава Ориона (магнитное поле направлено от картинной плоскости).

В работах [1, 2] показано, что направление магнитного поля меняется на противоположное при пересечении поверхности расположенной в северном полушарии на некотором расстоянии от плоскости Галактики. Предложенная в настоящей работе модель не противоречит этому, если считать вышеупомянутую поверхность границей, отделяющей область «гало» северного полушария от области местного спирального рукава. Уместно также отметить, что методом наименьших квадратов в [1—3] было найдено направление результирующего поля северного полушария (при $b > 15^\circ$), которое совпадает с направлением поля «гало» и почти на 180° отличается от направления поля местного рукава и южного полушария Галактики. Этот результат можно объяснить тем, что область II на рис. 2 имеет большие размеры и в среднем большие значения RM , по сравнению с областью I.

Изучению некоторых деталей карты рис. 2 и оценке величины вкладов областей местного рукава и «гало» в меру вращений радионисточников будет посвящена отдельная работа.

4. *Заключение.* На основе результатов настоящей работы можно предложить модель двухкомпонентного магнитного поля Галактики.

Магнитное поле у плоскости Галактики направлено вдоль спиральных рукавов, причем в соседних рукавах направления магнитных полей противоположны друг другу («бисимметричные» поля). Такие поля были обнаружены и в некоторых других спиральных галактиках [6, 7]. Бисимметричные магнитные поля для периферийных областей галактик получаются также по теории турбулентного динамо [28]. Магнитное поле спиральных рукавов — это всего лишь плоский компонент магнитного поля Галактики, с помощью которого, однако, как это было показано в третьем разделе, нельзя объяснить распределение (по l и b) мер вращений внегалактических радиоисточников. Это распределение, а также нетепловой фон и распределение космических лучей [11, 12] в Галактике можно объяснить, если предположить, что помимо плоского компонента в Галактике существует также другой компонент магнитного поля, далеко простирающийся по обе стороны плоскости Галактики и охватывающий область спиральных рукавов. Магнитное поле этого компонента, названного нами «галло», имеет противоположные направления в северном и южном полушариях. Можно предположить, что поле «галло» — это крупномасштабное дипольное поле, деформированное из-за дифференциального вращения Галактики. Таким образом, получается, что в Галактике существует бисимметричное поле спиральных рукавов, погруженное в общее дипольное магнитное поле Галактики. При этом следует отметить, что все результаты получены нами для расстояний от Солнца $\sim 5-6$ кпк.

Авторы выражают благодарность академику В. А. Амбарцумяну и доктору физ.-мат. наук М. А. Мнацаканяну за проявленный интерес к работе и ценные замечания.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

THE MODEL OF TWO-COMPONENT MAGNETIC FIELD OF THE GALAXY

R. R. ANDREASSIAN, A. N. MAKAROV

Faraday rotation of polarization planes of radiation of pulsars and extragalactic radio sources are used for the construction of the model of two-component magnetic field of the Galaxy. The first (plane) magnetic field component is parallel to the spiral arms of the Galaxy and has opposite directions in the neighbouring spiral arms. The second magnetic field component (the field of "halo") distributed on the large

distances from the Galactic plane occupies the spiral arms. The magnetic field of this region has opposite directions in the northern and southern hemispheres of the Galaxy and besides, the direction in the southern hemisphere is near the direction of the magnetic field in the local arm of the Galaxy.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Р. Андреасян, *Астрофизика*, 18, 707, 1980.
2. Р. Р. Андреасян, *Астрофизика*, 18, 255, 1982.
3. Р. Р. Андреасян, *Астрофизика*, 24, 363, 1986.
4. А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, А. В. Коваленко, *Астрон. ж.*, 55, 692, 1978.
5. J. P. Vallee, P. P. Kronberg, *Astron. and Astrophys.*, 43, 233, 1975.
6. Y. Sofue, U. Kleijn, R. Beck, R. Wielebinski, *Nobeyama Radio Observatory Report*, 38, 1, 1983; *Astron. and Astrophys.*, 144, 257, 1985.
7. J. P. Vallee, J. Roy, *Astron. Soc. Can.*, 78, 57, 1984.
8. Yu. S. Baryshnikova, A. A. Ruzmaikin, D. D. Sokoloff, A. M. Shukurov, *Astron. and Astrophys.*, 177, 27, 1987.
9. Р. Р. Андреасян, А. Н. Макаров, *Астрон. циркуляр*, 1500, 2, 1987.
10. J. P. Vallee, N. W. Broten, J. M. Macleod, *Astron. and Astrophys.*, 134, 199, 1984.
11. И. С. Шкловский, *Космическое радионизлучение*, Гостехиздат, М., 1956.
12. В. А. Гинзбург, В. С. Птушкин, *Успехи физ. наук*, 117, 585, 1975.
13. Р. М. Мурадян, *Астрофизика*, 14, 439, 1978.
14. R. M. Muradian, *Astrophys. and Space Sci.*, 69, 339, 1980.
15. Е. Паркер, *Космические магнитные поля*, Мир, М., 1982.
16. Y. M. Georgelin, Y. P. Georgelin, *Astron. and Astrophys.*, 49, 57, 1976.
17. P. A. Hamilton, A. G. Lyne, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 224, 1073, 1987.
18. Р. Манчестер, Дж. Тейлор, *Пульсары*, Мир, М., 1980.
19. H. Tabara, M. Inoue, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 39, 379, 1980.
20. M. Simard-Normandin, P. P. Kronberg, S. Butten, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 45, 97, 1981.
21. J. P. Vallee, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 51, 127, 1983.
22. M. Simard-Normandin, P. P. Kronberg, *Astrophys. J.*, 242, 74, 1980.
23. J. P. Vallee, *Astron. and Astrophys.*, 136, 373, 1984.
24. G. Courtes, Y. P. Georgelin, Y. M. Georgelin, G. Monnet, *IAU Symp.*, 38, 209, 1970.
25. J. P. Vallee, R. C. Bignell, *Astrophys. J.*, 272, 131, 1983.
26. Y. Sofue, M. Fujimoto, *Astrophys. J.*, 265, 722, 1983.
27. J. P. Vallee, *Astron. and Astrophys.*, 124, 147, 1983.
28. А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, А. М. Шукуров, *Astron. and Astrophys.*, 143, 335, 1985.