

увеличивается от  $\sim 10^{-9}$  до  $\sim 10^{-2}$  с ростом периода. Владимирский [153] предложил использовать параметр  $\eta$  для классификации пульсаров. На гистограмме  $N(\eta)$ , построенной по данным для 197 пульсаров, он обнаружил два максимума и минимум при  $\eta \approx 5 \cdot 10^{-6}$ . На этом основании были выделены две группы пульсаров: П-пульсары с  $\eta \lesssim 10^{-6}$  и О-пульсары с  $\eta \geq 5 \cdot 10^{-5}$ <sup>11</sup>).

Оказалось, что объекты группы П имеют в среднем короткие периоды. Максимум в распределении периодов для них приходится на значение  $P \sim 0,2 \div 0,3$  с. В то же время в О-пульсарах наблюдается два максимума (при  $P \sim 0,4 \div 0,5$  с и  $P \sim 1,2 \div 1,3$  с). Однако при использовании большего числа пульсаров минимум в распределении  $N(\eta)$  исчезает и остаётся один максимум как раз вблизи  $\eta = 5 \cdot 10^{-6}$  [154]. Кроме того, из определения (3) следует, что приблизительно  $\eta \propto P^3$ , т.е. по существу классифицирующим параметром является период  $P$ : малым  $\eta$ , в среднем, соответствуют малые периоды и наоборот. Отмеченное в работе [153] изменение формы импульса в О-пульсарах от простой к сложной при увеличении  $\eta$  отражает тот факт, что периоды у S-пульсаров, как правило, более короткие, чем у С-пульсаров.

Таким образом, различие П- и О-пульсаров обязано, в основном, различию их характерных периодов.

#### 4. КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ

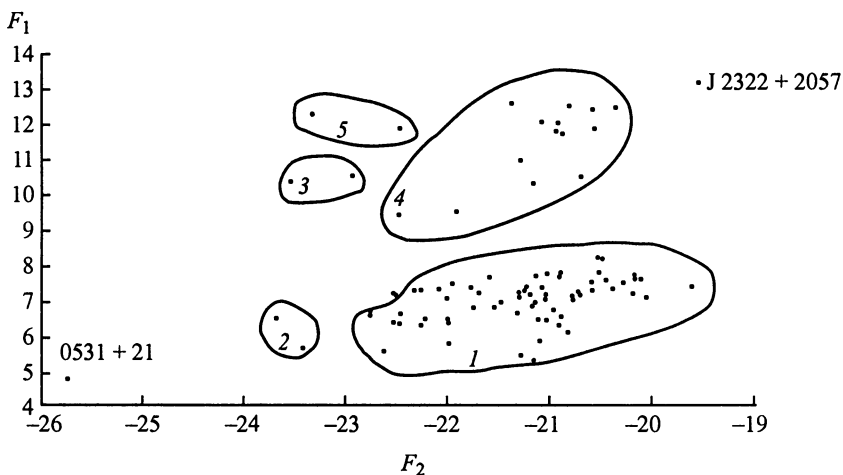
Существуют методы формального выделения кластеров объектов по тем или иным параметрам (см., например, [155–157]).

Первые применения метода главных компонент к пульсарам показали, что намечаются две группы пульсаров, в одной из которых преобладают источники с большими периодами [158, 159].

Используя данные каталога [16], Фракассини с соавторами [160] приняли для анализа возраст пульсара (с учётом затухания магнитного поля)  $\tau$ , расстояние объекта от оси Галактики  $R$ , скорость потери кинетической энергии вращения  $dE/dt$  и магнитное поле на поверхности  $B_0$ . В результате для двух первых

---

<sup>11</sup> П-пульсары связаны с типичными плерионами, О (old)-пульсары обладают признаками старых объектов.



**Рис. 35.** Представление кластеров пульсаров на плоскости двух главных компонент (5)

ортогональных нормализованных дискриминантных функций получены следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= -0,2350 \lg R + 0,2605 \lg (dE/dt) + 0,6203 \lg B_0 - 0,4909 \lg \tau, \\
 F_2 &= -0,2198 \lg R + 2,4254 \lg (dE/dt) + 1,8985 \lg B_0 + 2,8294 \lg \tau.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Диаграмма  $(F_1, F_2)$  проявляет наличие трёх групп пульсаров, соответствующих «ранним», «промежуточным» и «поздним» пульсарам, выделенным на диаграмме  $(P, dP/dt)^{12}$ . Анализируя функции (4), заметим, что кроме параметра  $R$ , влияние которого связано, по-видимому, с эффектами селекции, все остальные параметры в  $F_1$  и  $F_2$  зависят от  $P$  и  $dP/dt$ . Поэтому представляются естественными как соответствие групп пульсаров на двух указанных диаграммах, так и близость положения «ранних» пульсаров к положению П-пульсаров Владимирского, а положение «промежуточных» и «поздних» пульсаров к положению О-пульсаров [162]. Отметим, что одним из основных параметров опять является период пульсара  $P$ .

В работе [163] для 89 пульсаров в пространстве параметров  $P$  и  $dP/dt$ , расстояния от плоскости Галактики  $z$ , и радиосветимости

<sup>12</sup> В работе [161] по данным для 300 пульсаров на диаграмме  $(P, dP/dt)$  обнаружен «зазор», т.е. отсутствие пульсаров с  $dP/dt = (8,2 + 9,3) \cdot 10^{-15}$ . Авторы делают вывод о том, что нельзя объяснить эволюцию всех пульсаров единым законом  $dP/dt \propto P^{-1}$ .

$L$  обнаружено существование двух кластеров, двух неперекрывающихся популяций. В одной из них сосредоточены пульсары с  $P > 1$  с, в другой с  $P < 0,1$  с. Метод главных компонент позволяет выделить два первых собственных вектора:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0,053 \lg |z| - 0,416 \lg P - 0,883 \lg(dP/dt) + 0,208 \lg L, \\ F_2 &= 0,210 \lg |z| - 0,199 \lg P - 0,296 \lg(dP/dt) - 0,910 \lg L. \end{aligned} \quad (5)$$

В системе координат  $(F_1, F_2)$  также хорошо видны две отмеченные выше группы (рис. 35). Таким образом, формальные методы позволяют выделить два класса пульсаров: с короткими и с длинными периодами.

## 5. РАЗЛИЧИЕ ПУЛЬСАРОВ ПО МЕХАНИЗМАМ ЗАМЕДЛЕНИЯ

В течение всего времени исследования пульсаров считалось, что основное торможение вращения нейтронной звезды связано с потерей углового момента при магнитодипольном излучении на частоте её вращения<sup>13</sup>. Однако существует ряд других механизмов, приводящих к замедлению вращения нейтронной звезды: токовые потери [115], потери на излучение нейтронов, движущихся внутри нейтронной звезды [165, 166], потери через плазменный диск, расположенный около нейтронной звезды [167, 168], потери, связанные с нагревом токами и электрическими полями в верхних слоях магнитосферы [169, 170], торможение при движении нейтронной звезды через окружающую плазму [171]. Каждому из указанных механизмов будут соответствовать своя зависимость  $\frac{dP}{dt}(P)$  и свой трек на диаграмме  $dP/dt - P$  [172]. Сравнивая предсказания данной модели с наблюдаемым распределением точек на этой диаграмме, можно определить, какие из механизмов торможения реализуются в пульсарах. Традиционно считающееся основным магнитодипольное торможение приводит к зависимости

$$dP/dt = A/P, \quad (6)$$

---

<sup>13</sup> У пульсаров с самыми короткими периодами заметная часть энергии может теряться на гравитационное излучение, поскольку в этом механизме скорость потерь пропорциональна  $\Omega^6$  ( $\Omega$  – частота вращения нейтронной звезды) [164]. Кроме того, начальная стадия образования нейтронной звезды характеризуется значительными нейтринными потерями.