

Медленные и нормальные сбои в периоде пульсара В1822–09

Т. В. Шабанова^{1,*}

¹*Пуццинская радиоастрономическая обсерватория*

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н.Лебедева, Пуццино, Россия

1. ВВЕДЕНИЕ

Уникальность пульсара В1822–09 проявляется в том, что этот объект является пока единственным из всех существующих пульсаров, который демонстрирует сбои разного вида – медленные и классические.

Классические или нормальные сбои проявляются как внезапные, случайные скачки частоты вращения, которые наблюдаются на фоне равномерного векового уменьшения скорости вращения нейтронной звезды. Скачки вызывают увеличение частоты вращения ν звезды на малую относительную величину, изменяющуюся в пределах от $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-10}$ для небольших сбоев до $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-6}$ для гигантских сбоев. После больших сбоев обычно следует процесс релаксации, в течение которого скорость вращения пульсара стремится уменьшиться до исходного значения, которое было до сбоя. Для большинства пульсаров релаксация частоты вращения хорошо описывается двумя членами, включающими экспоненциальное уменьшение скорости вращения в течение короткого промежутка времени, изменяющегося от нескольких часов до нескольких недель, и линейное уменьшение скорости, которое может продолжаться в течение многих десятков лет. Указанные характерные черты классических сбоев схематично представлены на рис. 1а.

Совершенно иной класс сбоев был недавно обнаружен в периоде пульсара В1822–09 на основе наблюдений, выполненных на антенне БСА ФИАН Пуццинской Радиоастрономической обсерватории [1–5]. В течение 9 лет, с 1995 по 2004 гг., в скорости вращения этого пульсара наблюдалась серия из пяти медленных сбоев небольшой амплитуды, вызывающих увеличение частоты вращения на относительную

* Electronic address: tvsh@prao.ru

величину в пределах $\Delta\nu/\nu \sim (2.5 - 32) \times 10^{-9}$. Характерной особенностью медленных сбоя является постепенное увеличение скорости вращения звезды до максимального значения в течение 200–300 дней. Медленный рост частоты вращения со временем t хорошо аппроксимируется асимптотической экспоненциальной функцией вида $y = 1 - e^{-t/\tau}$, где τ есть временной масштаб. Заметной релаксации частоты вращения после сбоя не наблюдается. Два графика, показанные на рис. 1, четко демонстрируют разный характер изменения частоты вращения звезды при нормальных и медленных сбоях.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Регулярные наблюдения пульсара В1822–09 выполнялись на меридианном радиотелескопе БСА ФИАН Пушчинской Радиоастрономической обсерватории начиная с 1991 г. В последние два года наблюдения проводились на частоте 111.3 МГц с использованием 64×20 кГц каналов многоканального радиометра. Пульсар В1822–09 является достаточно слабым источником импульсного радиоизлучения на частоте 111 МГц и для большинства средних импульсов отношение сигнал/шум характеризовалось величинами $S/N = 7 - 12$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Нормальные сбои

В результате регулярных наблюдений пульсара В1822–09 был обнаружен сбой периода, который произошел 15 января 2007 г. и вызвал увеличение частоты вращения пульсара на относительную величину $\Delta\nu/\nu \sim 1.2 \times 10^{-7}$. Сбой был обнаружен в серии ежедневных наблюдений, поэтому эпоха сбоя MJD 54115.0(2) была определена с точностью до нескольких часов. На рис. 2 показаны остаточные отклонения в моментах прихода импульсов, в которых хорошо виден резкий отрицательный рост отклонений, обусловленный сбоем периода 2007 г. Скорость изменения отклонений соответствует смещению импульса в окне наблюдения на ~ 10.5 мс в сутки. На этом рисунке также видно изменение в наклоне кривой отклонений, обусловленное небольшим сбоем, происшедшим 10 января 2006 г., о котором сообщалось ранее.

Различный характер приращения частоты вращения $\Delta\nu$ при сбоях медленного и нормального типа хорошо виден на рис. 3, на котором изображено изменение скорости вращения пульсара B1822–09 на протяжении 22 лет с 1985 г. по 2007 г. Хорошо видно, что вращение пульсара не является стабильным в течение всего указанного интервала в 22 года, и, особенно, во второй его половине, в которой, начиная с сентября 1994 г., произошел целый ряд разнообразных скачкообразных изменений в скорости вращения звезды. В центральной части рис. 3а и 3б показаны изменения первой производной $\dot{\nu}$ и уклонений частоты $\Delta\nu$, обусловленные серией из пяти необычных, медленных сбоев, наблюдавшихся в течение 9-летнего интервала с 1995 г. по 2004 г.

Влияние на вращение пульсара двух нормальных сбоев, происшедших 10 января 2006 г. и 15 января 2007 г., показаны в правой части рис. 3. Из рис. 3б хорошо видно, что сбой 2007 г. является самым большим сбоем, который был зарегистрирован в периоде пульсара в течение всего интервала исследования с 1985 по 2007 гг. Его амплитуда в ~ 1.7 раза превышает суммарный эффект от всех предыдущих семи сбоев. Этот график также показывает, что после 1994 г. скорость вращения пульсара только увеличивалась и общий эффект от всех сбоев на февраль 2007 г. составил $\Delta\nu \sim 248 \times 10^{-9}$ Гц, что дает суммарное относительное увеличение частоты, равное $\Delta\nu/\nu \sim 1.9 \times 10^{-7}$. На рис. 3в уклонения частоты $\Delta\nu$ представлены относительно трех моделей замедления. Уклонения частоты, характеризующие два нормальных сбоя, показаны в самой правой части графика.

3.2. Медленные сбои

Центральная часть рис. 3а и 3б демонстрирует характер изменения скорости вращения звезды в результате медленных сбоев. Пунктирная параболическая кривая есть огибающая максимальных отклонений производной частоты $\Delta\dot{\nu}$, которые обусловлены медленными сбоями. Эпохи медленных сбоев отмечены верхними стрелками на рис. 3а и соответствуют времени, когда производная $\dot{\nu}$ достигает своего минимального значения. Увеличение скорости вращения звезды в результате медленных сбоев происходит постепенно и достигает своего максимального значения через 200-300 дней от начала события. Амплитуда медленных сбоев небольшая, изменится от $\Delta\nu/\nu \sim 2.5 \times 10^{-9}$ до $\sim 32 \times 10^{-9}$. Заметной релаксации частоты

вращения после сбоя не наблюдается. Наличие огибающей параболического вида для пиковых значений $\Delta\dot{\nu}$ указывает на взаимозависимость медленных сбоев. Анализ данных показал, что медленные сбои не являются изолированными событиями, а следуют один за другим, образуя серию из пяти взаимосвязанных событий, которые являются компонентами одного процесса. Действие этого процесса продолжалось в течение 9 лет с середины 1995 г. до середины 2004 г.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В скорости вращения пульсара был обнаружен сбой, который произошел 15 января 2007 г. и вызвал увеличение частоты вращения звезды на относительную величину $\Delta\nu/\nu \sim 1.2 \times 10^{-7}$. По сравнению с медленными сбоями, которые были обнаружены ранее на интервале 1995–2004 гг., новый сбой характеризовался быстрым, скачкообразным увеличением частоты вращения звезды в пределах суток. Значение этого сбоя состоит в том, что он указывает на существование двух классов сбоев в скорости вращения одного пульсара – с быстрым, скачкообразным увеличением скорости вращения в пределах суток и с медленным, постепенным увеличением скорости вращения в пределах нескольких сотен дней. Разные типы сбоев могут быть обусловлены или особенностями внутреннего строения нейтронной звезды или разными механизмами возникновения сбоев периода.

Сбои периода интерпретируются как внезапная передача углового момента от внутреннего сверхтекучего компонента, который вращается быстрее твердой коры, к твердой коре нейтронной звезды, с которой жестко связано магнитное поле и, соответственно, синхронизовано наблюдаемое нами импульсное радиоизлучение. Теоретические модели, которые объясняют происхождение обычных сбоев в скорости вращения пульсаров, основаны на рассмотрении таких явлений, как звездотрясение в твердой коре нейтронной звезды или катастрофическое, массовое открепление сверхтекучих вихревых линий нейтронной жидкости во внутренней коре нейтронной звезды.

Наиболее привлекательной моделью, объясняющей происхождение медленных сбоев в скорости вращения пульсара, является модель твердой кварковой звезды, предложенная в работе Пенга и Дзу [6]. Авторы показали на основе

численного моделирования, что модель твердой кварковой звезды хорошо объясняет происхождение серии из пяти медленных сбояв и отсутствие релаксации частоты вращения звезды после сбоя. Модель предполагает изменение формы поверхностного слоя кварковой звезды в процессе векового замедления вращения. Этот слой при определенных условиях, например, при разогреве от малого звездотрясения, может приобрести свойство вязкости и тогда переход к новой равновесной форме с меньшей сплюснутостью, соответствующей данной скорости вращения звезды, будет происходить плавно и при изменении формы поверхностный слой может как бы проскочить равновесное состояние. Тогда колебания формы около равновесного состояния будут приводить к медленным колебаниям частоты вращения звезды, которые и будут наблюдаться как медленные сбоя. Когда поверхностный слой все же примет форму, соответствующую данной скорости вращения, он сразу же застынет, чем объясняется отсутствие релаксации частоты вращения звезды после сбоя. Эта модель допускает существование не только медленных сбояв, но и сбояв обычной формы. В настоящее время кварковые звезды еще не обнаружены и пока неизвестно, могут ли они существовать. Авторы полагают, что медленные сбоя, обнаруженные в периоде пульсара B1822–09, могут служить своеобразным зондом для исследования холодной твердой кварковой материи.

-
1. T. V. Shabanova, *Astron. and Astrophys.* **337**, 723 (1998).
 2. T. V. Shabanova, and J. O. Urama, *Astron. and Astrophys.* **354**, 960 (2000).
 3. T. V. Shabanova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **356**, 1435 (2005).
 4. T. V. Shabanova, *Astrophys. and Space Sci.* **308**, 591 (2007).
 5. Т. В. Шабанова, Ю. П. Шитов *Астрон. журн.* **84**, 828 (2007).
 6. C. Peng, and R. X. Xu, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **384**, 1034 (2008).

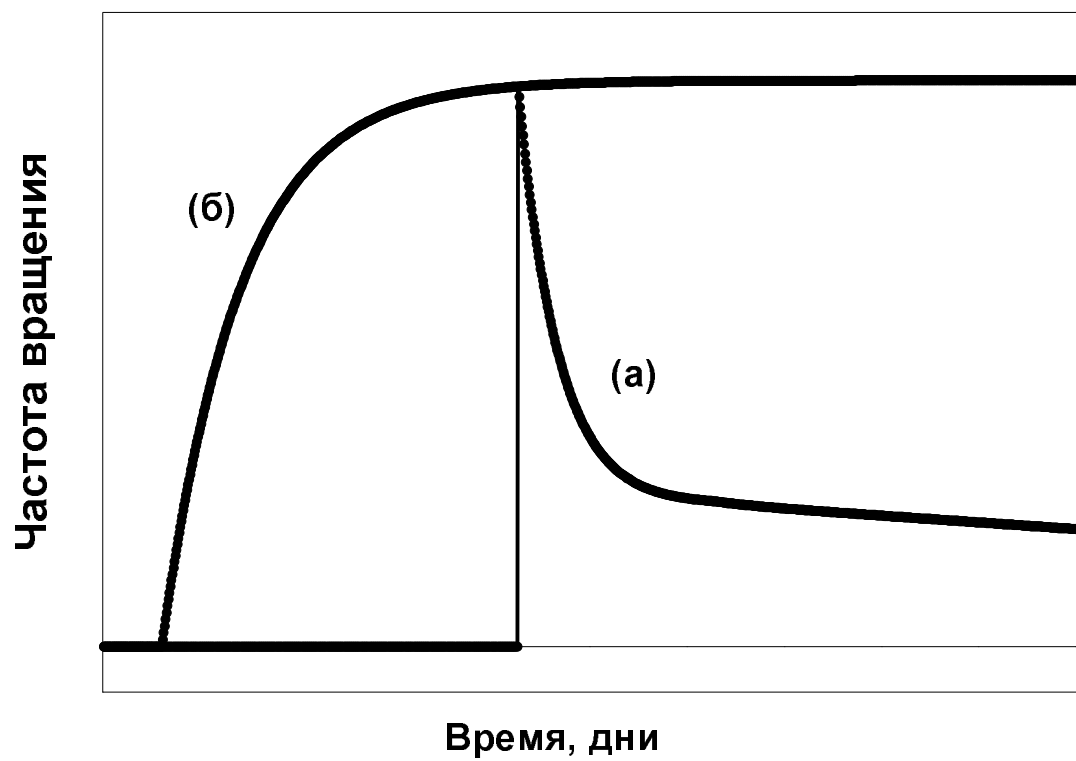


Рис. 1. Схематичное изображение изменения частоты вращения нейтронной звезды при сбоях (а) классического и (б) медленного типа. Вековое уменьшение скорости вращения звезды из рассмотрения исключено.

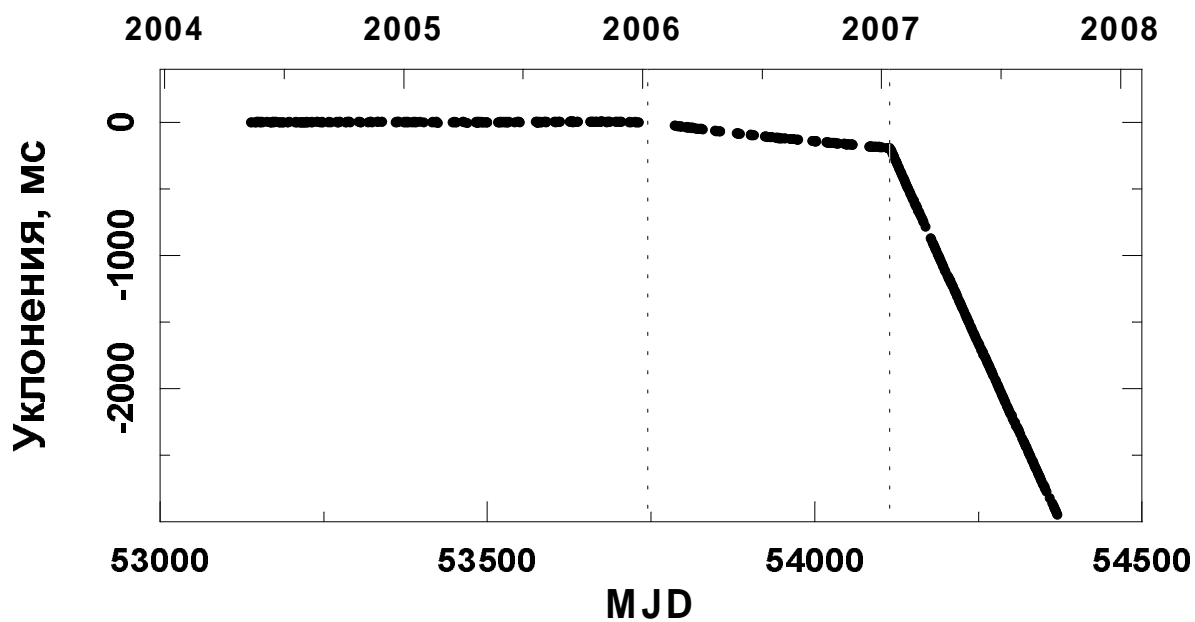


Рис. 2. Два сбоя нормального вида. Резкий отрицательный рост уклонений обусловлен новым, большим сбоем 2007 г. Небольшое изменение наклона кривой связано с малым сбоем 2006 г. Эпохи двух сбоев отмечены пунктирными линиями.

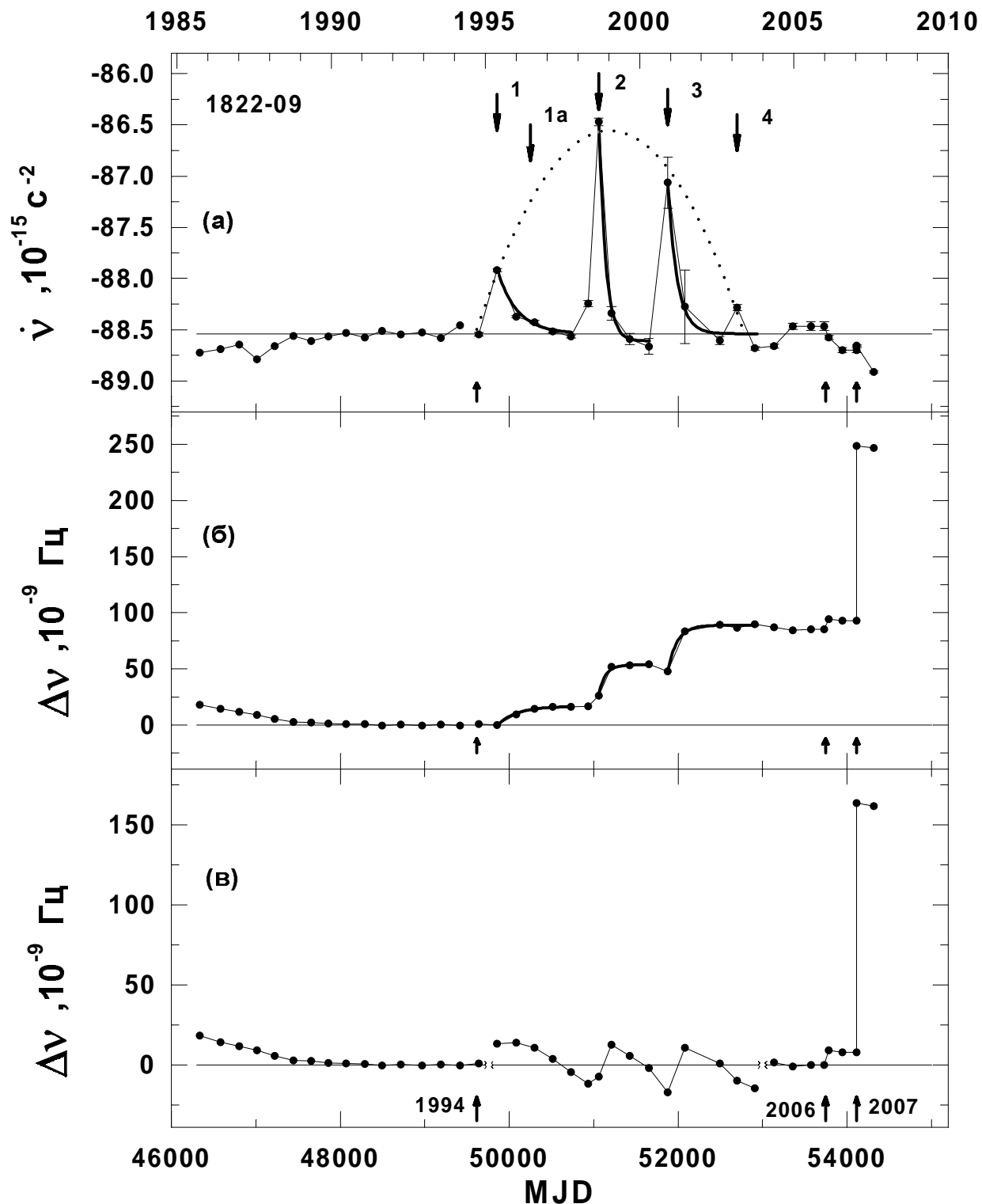


Рис. 3. Медленные и нормальные сбои в скорости вращения пульсара B1822–09 в течение 22-летнего интервала с 1985 по 2007 гг. (а)–изменение $\dot{\nu}$ со временем. Верхние стрелки отмечают эпохи медленных сбоев. (б)–уклонения частоты $\Delta\nu$. (в)– $\Delta\nu$ относительно трех моделей замедления. Новый сбой 2007 г. хорошо виден в правой части графика. Эпохи нормальных сбоев отмечены на каждом графике нижними стрелками.