

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МЕРЦАНИЯ ИСТОЧНИКОВ В0821+394 И В1812+412 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

© 2024 г. С. А. Тюльбашев^{1,*}, И. В. Чашей¹, И. А. Гришанова²,
Г. Э. Тюльбашева³, И. А. Субаев¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева, Астрокосмический центр,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Пушкино, Московская обл., Россия

²Пушчинский филиал Российского биотехнологического университета, РОСБИОТЕХ,
Московская обл., Пушкино, Россия

³Институт математических проблем биологии Российской академии наук (РАН),
филиал ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Московская обл., Пушкино, Россия

*E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024 г.

После доработки 29.05.2024 г.

Принята в печать 04.06.2024 г.

Проведен поиск долговременной переменности компактных компонентов радиоисточников В0821+394 и В1812+412 на интервале длительностью 10 лет. Для наблюдений использовался радиотелескоп БСА ФИАН с рабочей частотой 111 МГц. Характерные времена переменности для обоих источников по нашим оценкам составляют 1.5–2.5 года. Показано, что наблюдаемая переменность не связана с собственными вариациями потока излучения, а обусловлена рефракционными мерцаниями на неоднородностях межзвездной среды. Из полученных верхних оценок видимых угловых размеров источников следует, что основной вклад в рассеяние радиоизлучения вносит турбулентная плазма, сосредоточенная в достаточно тонких экранах, расстояние до которых не превосходит 300–400 пк.

Ключевые слова: компактные радиоисточники, межзвездные мерцания, межзвездное рассеяние

DOI: 10.31857/S0004629924080078 **EDN:** ISZRDR

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые о низкочастотной переменности, наблюдаемой в компактных радиоисточниках, сообщил Ханстед в 1972 г. [1]. В наблюдениях, проходивших на частоте 408 МГц (длина волны 74 см), он обнаружил переменность, природа которой была не ясна. В работе Ханстеда было отмечено, что поведение источников (изменчивость плотности потока) на низких частотах отличается от их поведения на высоких частотах.

Следом за Ханстедом ряд авторов [2–5] также провели поиск низкочастотной (80–408 МГц) переменности. В работе [2] было показано, что сильная переменность на частоте ~ 372 МГц в полной по потоку выборке (~ 1500 источников) наблюдается очень редко — один источник из трехсот (0.33%), а переменность в целом показывают 1.5% источников в выборке. Похожий результат получен в работе [5] по наблюдениям на 151 МГц. В этой работе был проведен поиск переменности у источников, имеющих размеры порядка угловой минуты, и переменность обнаружена у 1.1% источников. Для выборки

заведомо компактных источников, отобранных на частоте 408 МГц [3], доля источников с переменностью возросла до 25%.

Наблюдаемая низкочастотная переменность поставила вопрос о ее природе. Если причины переменности внутренние, в источниках должен находиться компактный компонент (активное ядро галактики, АЯГ), плотность потока которого меняется на временных масштабах месяцы или годы. То есть этот компонент должен быть виден не только на низких (метровый диапазон), но и на высоких (дециметровый и сантиметровый диапазон) частотах. Стандартная модель адиабатически расширяющегося источника [6–9] показывает, что чем ниже частота наблюдений, тем меньше должна быть доля переменного потока. При этом предполагается коррелированность переменного потока, наблюдаемого на высокой и низкой частотах. Однако сравнение коррелированной переменности источников часто показывает, что связи переменности на высоких и низких частотах не наблюдается.

Наблюдаемая низкочастотная переменность АЯГ может быть связана с рефракционными мерцаниями на межзвездной среде [10, 11]. В этом случае корреляции низкочастотной и высокочастотной переменности не будет, но для появления межзвездных мерцаний источники должны иметь компоненты малых угловых размеров. Очень вероятна и смесь внутренней (собственной) и внешней (из-за межзвездной среды) причин переменности. Таким образом, выявление природы переменности, наблюдаемой на низких (< 400 МГц) частотах — это работа, требующая долговременных рядов наблюдений, точных измерений плотности потока и анализа наблюдений, проведенных на разных частотах.

В 2019 г. была сделана попытка поиска переменности на частоте 111 МГц (длина волны 2.7 м) для трех источников с плоскими спектрами [12], ранее наблюдавшихся методом межпланетных мерцаний в выборке из 48 источников [13]. Кривые блеска (зависимость плотности потока от времени), полученные на интервале 5 лет, показали вероятную переменность для всех источников. Однако, характерные масштабы переменности ($\sim 2 - 3$ года), сопоставимые с длительностью ряда наблюдений, не позволили провести анализ данных. В настоящей работе проведен анализ кривых блеска, полученных на интервале 10 лет.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились на радиотелескопе Большая синфазная антенна (БСА) Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН). БСА ФИАН является меридианным инструментом, имеющим две независимые диаграммы направленности. Радиотелескоп БСА-1 предназначен для наблюдений отдельных радиоисточников с высоким частотно-временным разрешением. Диаграмма БСА-3 имеет 128 неуправляемых (стационарных) луча, имеющих фиксированные направления в плоскости меридиана и покрывающих склонения от -9° до $+55^\circ$. Центральная частота наблюдений 111 МГц, принимаемая полоса частот 2.5 МГц, время опроса точки 0.1 с. Мониторинговые наблюдения небесной сферы на БСА-3 с середины 2012 г. проводятся в ежедневном и круглосуточном режиме на 6-канальном приемнике с шириной канала 415 кГц. Размер диаграммы направленности антенны составляет примерно $0.5^\circ \times 1^\circ$. Время прохождения источника по половинной мощности занимает около 3.5 мин за день (за одну наблюдательную сессию). Мгновенное покрытие неба — 50 кв. град. (в 128 лучах), покрытие неба за сутки наблюдений составляет 17 000 кв. град.

Для контроля качества наблюдений 6 раз в сутки производится отключение антенны, а в антенно-фидерную систему подается калибровочный сигнал (калибровочная ступенька) известной температуры с помощью шумового генератора. Калибровочные ступеньки позволяют выравнивать сигналы в частотных каналах как на интервалах 4 часа (между двумя ступеньками), так и между ступеньками за весь срок наблюдений, если взять одну из ступенек за опорную. Так как температура ступеньки не изменяется со временем, можно выравнивать сигналы на интервалах годы.

Данные для поиска переменности от внегалактических радиоисточников брались из наблюдений на БСА-3. Подробно методика обработки наблюдений изложена в работе [12]. Здесь мы приводим основные шаги:

- вырезаем источник из мониторинговых данных и удаляем помехи. Если качество записи остается низким после удаления помех, исключаем запись из дальнейшей обработки;
- используем калибровочную ступеньку для выравнивания усиления;
- оцениваем интенсивность калибровочного и исследуемого источников в единицах температур;
- в полученной кривой блеска удаляем короткие по длительности помехи с помощью трехточечного медианного фильтра;
- усредняем интенсивности на полугодовом интервале (до этого шага исследуемые и калибровочные источники обрабатываются одинаково);
- предполагая, что плотность потока калибровочных источников не изменяется, а видимые отклонения на их кривых блеска связаны с физическим состоянием антенны, делим относительные интенсивности исследуемых источников на относительные интенсивности калибровочных источников и получаем окончательную кривую блеска;
- используя известные значения плотности потока калибровочных источников переводим интенсивности на кривых блеска с условных единиц интенсивности в янские.

Используя схему работы, описанную выше, мы получили кривые блеска на интервале 10 лет для источников B0821+394 (J0824+3916; 4C+39.23) и B1812+412 (J1814+4113; 4C+41.37). Эти источники имеют плоские спектры на высоких частотах и ранее исследовались на БСА методом межпланетных мерцаний в выборке источников с плоскими спектрами

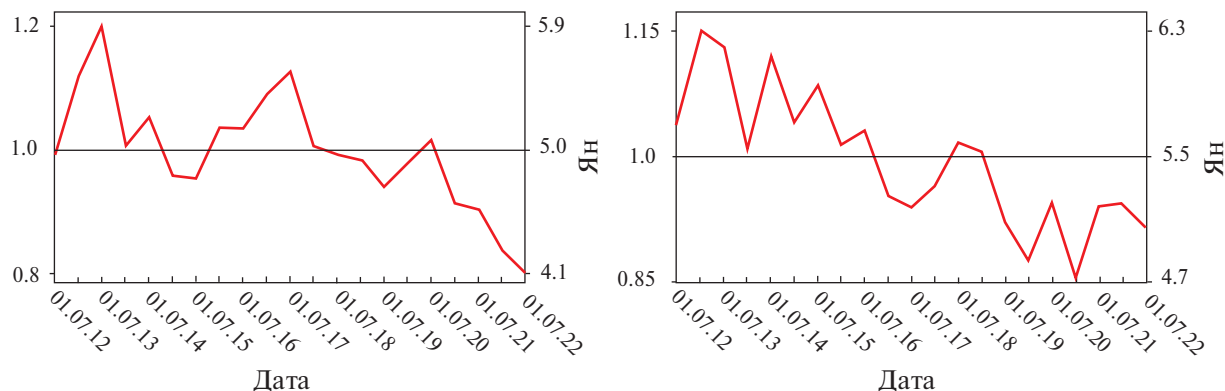


Рис. 1. Кривые блеска источников V0821+394 (слева) и V1812+412 (справа). Левая вертикальная ось на левой и правой панелях показывает интенсивность в долях от единицы (за единицу взято среднее значение интенсивности по всей кривой блеска), правая вертикальная ось показывает интегральную плотность потока источника в янских. На нижней горизонтальной оси размечено время в формате день, месяц, год. Шаг по времени между метками на горизонтальной оси составляет полгода.

(см. [13] и ссылки в ней). Все источники также характеризуются тем, что помимо компактного компонента на БСА определяется и их интегральная плотность потока, что позволяет определять долю энергии в компактном компоненте при известных угловых размерах. Полученные кривые блеска, отражающие интегральную плотность источников на полугодовых интервалах, приведены на рис. 1.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Временные масштабы переменности

На кривых блеска источников V0821+394 и V1812+412 видны перепады интенсивности $\sim 15\text{--}20\%$ от среднего значения. Согласно работе [12], ожидаемая точность оценок плотности потока при усреднении оценок интенсивностей за полгода достигает одного процента, поэтому все наблюдаемые перепады интенсивности должны определяться либо внутренней (собственной) переменностью, либо внешней (межзвездные мерцания) переменностью. Из рис. 1 видно, что характерные масштабы переменности интенсивности составляют 1.5–2.5 года. Интегральные плотности потоков $S_{\text{int}} = 5$ Ян и 5.5 Ян, минимальные и максимальные значения плотности потоков на кривой блеска составляют 4.1–5.9 и 4.7–6.3 Ян для V0821+394 и V1812+412 соответственно.

3.2. Температура и угловые размеры источников в случае собственной переменности

Если наблюдаемая переменность связана с изменениями в самом источнике, можно оценить его

температуру и угловые размеры. Угловые размеры определяются из линейных размеров источников (верхняя оценка размера связана с характерным масштабом переменности) и расстояния до источника (см., напр., базу данных NED¹). Плотности потоков компактных компонентов определены в работе [12]. Согласно формуле, приведенной в работе [14], яркостная температура определяется как

$$T_b = 5.44 \times 10^9 \times \left[\frac{S_c(1+z)}{\theta^2} \right] \text{К}, \quad (1)$$

где S_c — это плотность потока компактного радиоисточника в Янских, θ — размер источника в угловых миллисекундах (milliarc second, mas). Исходя из плотности потока компактного компонента $S_c = 0.5\text{--}1.0$ Ян [12], верхних оценок угловых размеров компонентов $\theta = 0.02$ и 0.015 mas (вычислены с помощью NED), красных смещений $z = 1.215$ и 1.564 для V0821+394 и V1812+412 соответственно, получим $T_b > 10^{13}$ К. Эта температура на порядок больше комптоновского предела 10^{12} К, поэтому собственная переменность источников кажется маловероятной.

3.3. Параметры источников в предположении рефракционных мерцаний

Излучение от компонентов внегалактического радиоисточника проходит через межзвездную среду в гало и в плоскости Галактики и рассеивается по пути. Таким образом, межзвездная среда определяет нам минимальные видимые угловые размеры источ-

¹ <https://ned.ipac.caltech.edu/>

ников. Согласно [11] можно определить эти минимальные размеры (угол рассеяния), как

$$\Theta \approx 8\lambda^2 (\operatorname{cosec} b)^{0.5} \text{ mas}, \quad (2)$$

где λ и b — это длина волны в метрах и галактическая широта, на которой виден источник. В нашем случае $\lambda = 2.7$ м, а галактические широты для В0821+394 и В1812+412 равны, соответственно, 34.714° и 23.841° . Оценки угла рассеяния составляют 77 mas и 92 mas (верхние оценки наблюдаемых размеров источников). Минимальное рассеяние для внегалактических радиоисточников должно наблюдаться в направлениях с минимумом поглощения в межзвездной среде. Так, минимальный угол рассеяния на частоте 111 МГц, согласно формуле (2), должен быть около 58 mas. Согласно измерениям угловых размеров пульсаров и квазаров, проведенных на частоте 102.5 МГц [15], минимальные зарегистрированные угловые размеры составили 60 mas. Таким образом, значения углов рассеяния, получаемых по формуле (2), и экспериментальные результаты, полученные для этих же частот на радиотелескопе БСА ФИАН, сходятся. Видимые угловые размеры обоих источников из-за неизбежного рассеяния в межзвездной среде, будут в сотни раз больше, чем оцененные из характерных масштабов переменности. Именно межзвездное рассеяние и ограничит предельное угловое разрешение внегалактических радиоисточников в метровом диапазоне длин волн.

Оценим, при каких угловых размерах режим межзвездных мерцаний будет слабым, а мерцания будут не насыщенными. Согласно работе [16, ф-ла (2.3)]:

$$\theta_{\text{weak}} \approx 8 \times 10^{-6} (L_{\text{kpc}} f_{\text{GHz}})^{-1/2} \text{ arcsec}, \quad (3)$$

где θ_{weak} — это угловой размер источника, разграничивающий режимы слабых и насыщенных мерцаний, L_{kpc} и f_{GHz} — расстояние до экрана (для оценок бралось значение 5 кпк) и частота наблюдений (0.111 ГГц). Угловой размер $\theta_{\text{weak}} \approx 0.01$ mas, что во много раз меньше диска рассеяния. Следовательно, если наблюдаемая переменность связана с межзвездными мерцаниями в режиме насыщения, то это будут рефракционные мерцания.

Можно оценить также долю энергии, излучаемую компактным компонентом. Она определяется видимым индексом мерцаний источников,

$$m = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle}, \quad (4)$$

где I — интенсивность в условных единицах. Индексы мерцаний $m = 0.26$ (В0821+394) и $m = 0.29$ (В1812+412) примерно равны. Так как источники компактные, теоретическое значение индекса мерцаний m_0 , отнесенное к компактному компоненту, будет равно $m_0 = 1$, и в этом случае видимое значение m непосредственно определяет долю энергии мерцающего компонента. Следовательно, энергия в компактном (мерцающем на межзвездной плазме) компоненте будет равна $S_c = 1.3$ Ян и 1.6 Ян для В0821+394 и В1812+412.

Исходя из того, что наблюдаемая переменность связана с рефракционными мерцаниями, можно оценить видимые угловые размеры источников [17]:

$$\frac{L_0}{v} = 1.7\tau \frac{\sin b}{\theta_m}, \quad (5)$$

где L_0 — это половина толщины просвечиваемого слоя в парсеках в сторону Галактического полюса, v — скорость в км/с, τ — характерное время переменности в днях, θ_m — измеряемый угловой размер в единицах mas. Пусть $L_0 = 5000$ пк (то есть рассматриваем случай толстой статистически однородной среды, когда излучение проходит сквозь гало и часть галактической плоскости), $v = 50$ км/с, $\tau = 730$ дней (2 года = $365 \times 2 = 730$). Тогда получаем оценку углового размера $\theta_m \approx 6$ mas для обоих источников. Так как угол рассеяния, связанный с межзвездной средой и оцененный по формуле (2) на порядок больше (см. выше), наблюдаемая переменность не может быть связана с толстой средой.

Естественное объяснение различий в оценках угла рассеяния состоит в том, что основная модуляция излучения происходит в тонком экране, расположенном достаточно близко к Солнцу. Существование таких экранов в межзвездной среде было показано, например, в работах [18, 19] на основе анализа данных измерений пульсаров. В рассмотренных в настоящей работе случаях, если расстояние до экрана 500 пк, рассеяние на турбулентности в экране будет приводить к видимым угловым размерам, равным примерно 60 mas. Если исходить из оценок углов рассеяния, то есть минимально возможных видимых угловых размеров, равных 77 mas и 92 mas (для В0821+394 и В1812+412 соответственно), расстояние до экранов будет 390 пк и 325 пк. Оцененное расстояние до экранов — это верхний предел, тогда как реальные экраны могут быть расположены еще ближе.

Рассеяние в межзвездной среде определяет нам видимые угловые размеры источников и в то же время ограничивает видимые температуры. Учитыв-

вая рассеяние, можно оценить действительную температуру источников, и даже выявить их структуру при наличии многочастотных РСДБ наблюдений (см., напр., [20]). Однако, для получения оценок температур по наблюдениям на БСА требуются оценки угловых размеров источников из РСДБ наблюдений, проведенных на частоте 111 МГц.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оба источника имеют многочисленные РСДБ наблюдения. Источник В0821+394 входит в выборку источников, наблюдаемых в проекте MOJAVE² [21]. В опубликованной кривой блеска видно, что на частоте 15 ГГц плотность потока колеблется вблизи $S_c = 1$ Ян, что очень близко к приведенному в параграфе выше среднему на интервале 10 лет значению $S_c = 1.3$ Ян. Согласно анализу, проведенному в работе [12], основная плотность потока определяется компонентом, имеющим угловой размер 1–2 mas, при общем размере источника 5 mas на частоте 15 ГГц [21]. То есть, спектр компактного компонента В0821+394 остается плоским в широком диапазоне длин волн. Согласно РСДБ наблюдениям В1812+412 на 5 ГГц [22], основная энергия исходит из компонента размером 0.3×0.4 mas при общей длине источника 10 mas.

Размеры компактных компонентов источников В0821+394 и В1812+412 таковы, что рассеяние этих компонентов на межзвездной среде должно наблюдаться как для случая толстой среды, так и для случая тонкого экрана. Детали, определяющие основную плотность потока источников, разрешены в РСДБ наблюдениях. Поэтому наблюдаемые вариации интенсивности не могут быть связаны с собственной переменностью. Напомним, что для случая собственной переменности детали должны быть меньше 0.02 mas.

Таким образом, рефракционные межзвездные мерцания позволяют определить угловой размер источника, если в направлении источника есть тонкий экран и расстояние до экрана известно, либо дать оценку расстояния до экрана, если наблюдаемую переменность можно связать с межзвездными мерцаниями, а видимые угловые размеры источника известны. Случайно совпало, что разрешение методов межзвездных мерцаний (в настоящей работе) и межпланетных мерцаний [15] при наблюдениях на БСА ФИАН близки. Толстый экран можно, по-видимому, исключить из рассмотрения для всех или

почти всех направлений на небе. Межзвездные мерцания, вероятно, связаны с турбулентностью, сосредоточенной в достаточно тонких экранах. Тонкие экраны могут располагаться в разных направлениях на разных расстояниях, и эти расстояния можно оценить, взяв видимые угловые размеры источников, определенные по межпланетным мерцаниям или с помощью РСДБ методов.

Помимо нескольких «волн переменности» на рис. 1 для обоих источников виден тренд уменьшения плотности потока со временем. Минимальное характерное время переменности по этому тренду составляет 10 лет. Если наблюдаемое падение плотности потока связано с рефракционными мерцаниями, то это может говорить еще об одном тонком экране, располагающемся на расстоянии, не превышающем 100 пк.

В заключение отметим главные результаты:

- наблюдения на интервале 10 лет позволили надежно определить долговременную переменность В0821+394 и В1812+412;
- сделанные выше оценки углов рассеяния показывают, что наблюдаемая переменность с характерными временами 1.5–2.5 года связана с межзвездными рефракционными мерцаниями на тонких экранах, расстояние до которых не превышает 400 пк.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность антенной группе БСА за постоянную поддержку работы радиотелескопа в режиме мониторинга и Л. Б. Потоповой за помощь при оформлении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. W. Hunstead, *Astrophys. Letters* 12, 193 (1972).
2. W. D. Cotton, *Astrophys. J. Suppl.* 32, 467 (1976).
3. C. Fanti, R. Fanti, A. Ficarra, F. Mantovani, L. Padrielli, and K. W. Weiler, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 45, 61 (1981).
4. O. B. Slee, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 235, 1313 (1988).
5. M. M. McGilchrist and J. M. Riley, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 246, 123 (1990).
6. I. S. Shklovsky, *Nature* 206, 176 (1965).
7. H. van der Laan, *Nature* 211, 1131 (1966).
8. A. P. Marscher and W. K. Gear, 298, 114 (1985).
9. K. J. Mitchell, B. Dennison, J. J. Condon, D. R. Altschuler, H. E. Payne, S. L. O'Dell, and J. J. Broderick, *Astrophys. J. Suppl.* 93, 441 (1994).

²<https://www.cv.nrao.edu/MOJAVE/sample.html>

10. *N. Ya. Shapirovskaya*, *Soviet Astron.* 22, 544 (1978).
11. *B. J. Rickett*, 307, 564 (1986).
12. *S. A. Tyul'bashev*, *P. Yu. Golysheva*, *V. S. Tyul'bashev*, and *I. A. Subaev*, *Astron. Rep.* 63(11), 920 (2019).
13. *S. A. Tyul'Bashev* and *P. Augusto*, *Astron. and Astrophys.* 439(3), 963 (2005).
14. *Y. Y. Kovalev*, *K. I. Kellermann*, *M. L. Lister*, *D. C. Homan*, *et al.*, *Astron. J.* 130(6), 2473 (2005).
15. *V. S. Artyukh* and *T. V. Smirnova*, *Soviet Astron. Letters* 15(5), 344 (1989).
16. *B. J. Rickett*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 28, 561 (1990).
17. *F. Mantovani*, *R. Fanti*, *L. Gregorini*, *L. Padrielli*, and *S. Spangler*, *Astron. and Astrophys.* 233, 535 (1990).
18. *T. V. Smirnova*, *V. I. Shishov*, *M. V. Popov*, *C. R. Gwinn*, *et al.*, 786(2), id. 115 (2014).
19. *V. I. Shishov*, *T. V. Smirnova*, *C. R. Gwinn*, *A. S. Andrianov*, *M. V. Popov*, *A. G. Rudnitskiy*, and *V. A. Soglasnov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 468(3), 3709 (2017).
20. *S. V. Pilipenko*, *Y. Y. Kovalev*, *A. S. Andrianov*, *U. Bach*, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 474(3), 3523 (2018).
21. *M. L. Lister*, *M. F. Aller*, *H. D. Aller*, *D. C. Homan*, *et al.*, *Astron. J.* 146(5), id. 120 (2013).
22. *D. R. Henstock*, *I. W. A. Browne*, *P. N. Wilkinson*, *G. B. Taylor*, *R. C. Vermeulen*, *T. J. Pearson*, and *A. C. S. Readhead*, *Astrophys. J. Suppl.* 100, 1 (1995).

INTERSTELLAR SCINTILLATION OF SOURCES B0821+394 AND B1812+412 ACCORDING TO OBSERVATIONS ON THE LPA LPI RADIO TELESCOPE

**S. A. Tyul'bashev^{1,*}, I. V. Chashei¹,
I. A. Grishanova², G. E. Tyul'basheva³,
I. A. Subaev¹**

¹*Lebedev Physical Institute, Astrospace center, Pushchino radio astronomy observatory,
Pushchino, Moscow region, Russia*

²*Pushchino branch of Russian Biotechnological University (Rosbiotech), Pushchino, Moscow region, Russia*

³*Institute of Mathematical Problems of Biology RAS (IMPB RAS) branch of Keldysh
Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow region, Russia*

*E-mail: serg@prao.ru

The search for long-term variability of compact components of radio sources B0821+394 and B1812+412 over an interval of 10 years was carried out. The LPA LPI radio telescope with an operating frequency of 111 MHz was used for observations. According to our estimates, the characteristic time of variability for both sources is 1.5–2.5 years. It is shown that the observed variability is not related to intrinsic variations in the radiation flux, but is due to refractive scintillation on inhomogeneities of the interstellar medium. From the obtained upper estimates of the apparent angular dimensions of the sources, it follows that the main contribution to the scattering of radio emission is made by turbulent plasma concentrated in sufficiently thin screens, the distance to which does not exceed 300–400 pc.

Keywords: compact radio sources; interstellar scintillation; interstellar scattering