

УДК 52.77

ПОИСК ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ В НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКАХ С ПЛОСКИМИ СПЕКТРАМИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА 111 МГц

© 2019 г. С. А. Тюльбашев^{1*}, П. Ю. Голышева², В. С. Тюльбашев¹, И. А. Субаев¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.03.2019 г.; после доработки 29.04.2019 г.; принята к публикации 29.04.2019 г.

Проведен поиск долговременной переменности для трех источников с плоскими спектрами. Для поиска переменности использовались мониторинговые наблюдения, проходящие в течение 5.5 лет на антенной решетке БСА ФИАН. У всех источников обнаружена переменность на низких частотах. Для определения относительных изменений интенсивности использовался шумовой сигнал известной температуры. Точность оценки плотности потока в относительных единицах достигла примерно 1%. Изменения наблюдаемой интенсивности исследованных радиоисточников больше 6%. Вероятнее всего найденная переменность источников V0821+394, V1812+412 и V2247+140 связана с рефракционными межзвездными мерцаниями.

DOI: 10.1134/S0004629919100062

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые переменность на низких частотах на временном масштабе порядка года была выявлена Ханстедом [1] по наблюдениям на частоте 408 МГц для четырех радиоисточников. Обнаружение переменности на низких частотах было неожиданным, так как массово наблюдаемую переменность на высоких частотах на тот момент времени объясняли внутренними механизмами (модель адиабатически расширяющегося источника [2, 3]), и, согласно теории, наблюдаемая степень переменности должна была сильно падать к низким частотам. Изменение наблюдаемых плотностей потока источников в 1.5 раза на низкой частоте противоречило этой модели.

За работой [1] последовал ряд работ, в которых проверялось существование переменности на низких частотах. Наблюдения на частотах 360–385 МГц полной выборки полутора тысяч источников позволили обнаружить 5 источников с сильной переменностью и, возможно, еще 17 источников с переменностью, требующей подтверждения [4]. Согласно этой работе, примерно 2% источников полной выборки имело заметную переменность на низкой частоте. Наблюдения выборки 114 источников на частоте 408 МГц на пятилетнем интервале

с оценками плотности потока раз в месяц [5] показали явную или очень вероятную переменность у 44 источников. При этом авторами были выделены однородные выборки. Переменность наблюдалась у 8 источников, входящих в однородную выборку из 32 источников с малыми угловыми размерами (т.е. 25% источников этой выборки показали переменность) и у 23 источников, входящих в однородную выборку источников с плоскими спектрами (т.е. 51% источников этой выборки переменные). Наблюдения 412 из 2000 источников на интервале 14 лет на частотах 80 и 160 МГц [6] показали, что 47% всех источников показывают существенную переменность на временном масштабе месяцы и годы. Однако, наблюдения 811 разрешенных в интерферометрических наблюдениях источников из полной выборки источников 7С каталога, проведенные на близкой частоте 151 МГц, показали [7], что лишь 1.1% источников с интегральной плотностью потока между 0.3 и 3 Ян имеют переменность больше 15%, и нет ни одного источника с плотностью потока больше 3 Ян, показывающего переменность больше 4%. Таким образом, ранние долговременные наблюдения, несмотря на их некоторую противоречивость, касающуюся доли переменных источников в выборках, указывали, что наблюдаемая переменность на низкой частоте

*E-mail: tyulbashevs@mail.ru

реальна. Оставался вопрос о природе этой переменности.

Как известно, наблюдаемая переменность может быть связана как с внутренними причинами (собственная переменность), так и с внешними причинами (межзвездные мерцания). В случае внутренней переменности должна наблюдаться корреляция наблюдаемых рядов плотностей потоков на разных частотах. Ранняя проверка корреляции по двум наблюдаемым источникам была сделана уже в первой работе с обнаружением переменности на низкой частоте [1], и такой корреляции не было обнаружено. В работе [8] сведены многочастотные (0.4–15 ГГц) наблюдения 51 источника, показывающие переменность на низкой частоте. Для некоторых из источников длительность рядов достигает 15 лет. Было показано возможное существование переменности на низкой частоте трех разных классов. Первый класс источников — это источники, которые переменны лишь на низких частотах и не показывают изменений плотности потока на частотах выше 2.3 ГГц. Второй класс — источники, показывающие переменность как на низких, так и на высоких частотах, и достигающие минимума переменности вблизи частоты 2.3 ГГц. Корреляция плотностей потоков рядов наблюдений выше 2.3 ГГц и ниже 2.3 ГГц отсутствует. Третий класс источников — источники, которые имеют корреляцию переменности от высоких к низким частотам. Переменность на низкой частоте у источников первого и второго класса хорошо объясняется рефракционными мерцаниями на межзвездной среде [9, 10]. Коррелированная переменность считается связанной с внутренними процессами, происходящими в источнике, и сводится к модели облака, расширяющегося с релятивистской скоростью [11]. Похожие результаты с анализом многочастотных долговременных наблюдений получены и в работе [12].

Суммируя результаты, полученные в ранних работах, можно заключить, что переменность источников может быть вызвана как внутренними, так и внешними факторами. Если источник имеет достаточно малые размеры, которые сравнимы или меньше френелевских размеров ($a_{\text{Fr}} = (z/k)^{1/2}$), где z — расстояние до модулирующего слоя, а k — волновое число), будут наблюдаться мерцания на межзвездной среде. Если радиисточник имеет переменность, связанную с его релятивистским расширением, то в нем должна наблюдаться корреляция переменности на разных частотах, и чем ниже частота наблюдений, тем меньше относительные изменения наблюдаемой плотности потока, связанные с релятивистским расширением облака. При этом внутренняя переменность не отменяет возможной переменности и на межзвездной среде, так как, если расширяющееся облако имеет угловые

размеры меньше френелевских, то межзвездные мерцания этого компактного радиисточника будут наблюдаться независимо от других процессов. Вклад разных видов переменности в наблюдаемый временной ряд точек плотности потока (кривую блеска) можно выявить лишь путем анализа данных.

Отметим, что анализ наблюдений переменности источников — одна из возможностей оценить угловые размеры компонентов в источнике. На сегодняшний день наилучшее угловое разрешение в метровом диапазоне, достигнутое интерферометрическими методами на системе апертурного синтеза LOFAR (<http://www.astron.nl/lofar-telescope/lofar-telescope>), определяется базой 2000 километров. Например, для центральной частоты 150 МГц (длина волны 2 метра) угловое разрешение будет $\sim 0.2''$. Наблюдения рефракционных мерцаний на межзвездной среде дают возможность обнаруживать компактные компоненты радиисточников на порядок меньшего углового размера, чем может быть достигнуто в реальных интерферометрических наблюдениях на наземных базах.

Как видно из ранних работ, характерное время переменности, наблюдаемой на низких частотах, может быть от нескольких месяцев до нескольких лет. Следовательно, для массового исследования компактных радиисточников с целью поиска их мерцаний на межзвездной среде необходимы ряды наблюдений длительностью хотя бы 5–10 лет. С 2012 г. в Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) на Большой синфазной антенне (БСА ФИАН) проводятся круглосуточные многолучевые мониторинговые наблюдения на частоте 111 МГц для разных проектов. Это проект “Космическая погода” [13], проекты поиска пульсаров и быстрых транзиентов [14, 15]. Эти же мониторинговые наблюдения позволяют поставить задачу поиска переменности для больших выборок источников, включая и полные выборки. Для проверки возможности такого поиска было взято несколько источников с плоскими спектрами из работы [16]. Межпланетные мерцания этих источников наблюдались на БСА ФИАН, и поэтому эти источники заведомо имеют компактные компоненты с угловыми размерами меньше угловой секунды, а как показано в работе [5], половина источников с плоскими спектрами показывают и переменность на низких частотах.

Цели данного проекта — массовый поиск компактных радиисточников с угловыми размерами несколько десятков миллисекунд и меньше, поиск источников, имеющих собственную переменность на низких частотах, поиск переменных источников с характерными масштабами переменности меньше месяца.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

После перевода антенны БСА ФИАН с частоты 102.5 МГц на частоту 111 МГц с 2003 г. были начаты тестовые наблюдения мерцающих источников в 16-лучевом режиме [17]. Эти лучи перекрывали по склонениям область размером примерно в 8° . В 2012 г. были завершены работы по строительству дополнительной независимой диаграммы направленности, произведена замена малошумящих усилителей антенны и создана дополнительная система диаграммообразования [13]. Новая диаграмма направленности БСА ФИАН имеет 128 лучей, но на настоящий момент времени лишь 96 из них подключены к специально созданным цифровым приемникам. Эти лучи перекрывают склонения от -9° до $+42^\circ$. Эффективная площадь антенны в направлении на зенит после проведенных работ повысилась примерно до 45 000 кв. м. С середины 2012 г. на БСА ФИАН ведутся круглосуточные наблюдения в 48 лучах, а с 2013 г. — в 96 лучах. В первую очередь эти наблюдения используются для прогнозирования “Космической погоды” и долгосрочных исследований солнечной активности [13], а также для поиска пульсаров и транзиентов типа RRAT [14, 15]. Мониторинговые наблюдения ведутся в 6 и 32-частотном режимах при частоте опроса 100 и 12.5 мс (начиная с августа 2014 г.). Эти же наблюдения можно использовать и для поиска долгосрочной переменности. В дополнение к регулярным наблюдениям есть также и нерегулярные наблюдения участков на небе, полученные в режиме круглосуточного мониторинга в полосках шириной 8° по склонению, проходившие в период 2006–2012 гг. в 16 лучах антенны на аналоговом регистраторе при постоянной времени 100 мс.

Для контроля прохождения принимаемых сигналов раз в 4 часа (6 раз в сутки) на вход малошумящих усилителей, подключенных непосредственно к выходам дипольных рядов антенны, подается сигнал от шумового генератора (калибровочная ступенька). На рис. 1 представлена эта ступенька и рядом с ней радиоисточник 3С 310. Шумовой сигнал соответствует температуре 2400 К с точностью 2–3% [13], и его можно использовать для калибровки входящих сигналов. Предполагая, что при отключении сигнала от антенны (нижняя граница ступеньки) температура составляет 300 К, можно составить пропорцию перевода единиц аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в единицы температур: 1 единица перевода есть $H_{\text{ступеньки}}$ в градусах ($= 2400 - 300$) / $H_{\text{ступеньки}}$ в единицах АЦП.

В течение суток и в течение года высота ступеньки в единицах АЦП меняется. Это связано, в первую очередь, с изменением суточной и сезонной

температуры, что приводит к изменению общего усиления в антенно-фидерном тракте. Сезонные изменения высоты ступеньки в единицах АЦП составляют примерно 25–30% от среднего уровня, а ежедневные — примерно 10–15%. На рис. 2 приведен пример сезонных изменений в одном из лучей БСА ФИАН за 3 года и пример изменений наблюдаемой высоты ступеньки в этом же луче за несколько дней.

Так как высота калибровочной ступеньки непрерывно изменяется со временем, чтобы провести калибровку по ступеньке, нужно знать ожидаемую высоту ступеньки в произвольном месте записи. Зная координату источника по прямому восхождению и расположение ступенек по московскому времени, можно рассчитать точное положение источника между ступеньками и сделать линейную аппроксимацию для расчета ожидаемой высоты ступеньки в месторасположении источника. Затем для исследуемых источников можно найти их высоту в единицах АЦП и выразить ее в единицах высоты ступеньки. Таким образом будет произведена калибровка исследуемого источника по ступеньке.

Согласно [5] половина источников с плоскими спектрами в однородной выборке показывают переменность. Поэтому для отладки методики были взяты 3 источника с плоскими спектрами из работы [16]. Источники V0821+394/J0824+3916, V1812+412/J1814+412 и V2247+140/J2250+1419, согласно нашим ранним наблюдениям методом межпланетных мерцаний на частоте 102.5 МГц, имеют заметные компактные компоненты. Интегральная плотность потока источников больше 3 Ян, что позволяет легко отделять фоновое излучение от их собственного излучения.

Вообще говоря, сделать оценку наблюдаемой плотности потока исследуемого радиоисточника можно двумя разными способами. Для реализации первого способа берется набор калибровочных радиоисточников, имеющих известные плотности потока. Для каждого из источников делается оценка его высоты в единицах АЦП, а затем высчитывается коэффициент перевода из единиц АЦП в янские за данный день. Следующим шагом высчитывается среднее по этим коэффициентам перевода. Полученное значение этого коэффициента за данный день используется для оценки плотности потока исследуемого источника после оценки его высоты в единицах АЦП. При этом неявно предполагается, что усиление в тракте радиотелескопа в течение дня не меняется, а ионосферные сдвиги координат калибровочных источников несущественны. Методы обработки наблюдений данных с БСА ФИАН с использованием калибровочных источников для

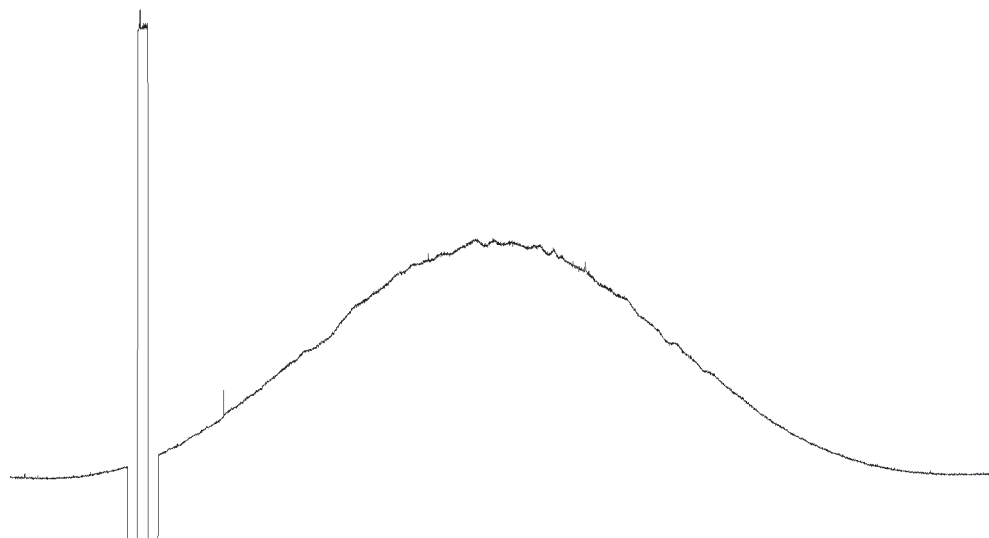


Рис. 1. Калибровочная ступенька и радиисточник ЗС 310. Небольшая волнообразная структура на вершине ЗС 310 вызвана ионосферными мерцаниями. Общая длительность записи на рисунке около 8 мин. Плотность потока радиосточника, оцененная из интегрального спектра по базе данных NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/classic/>) составляет примерно 100 Ян.

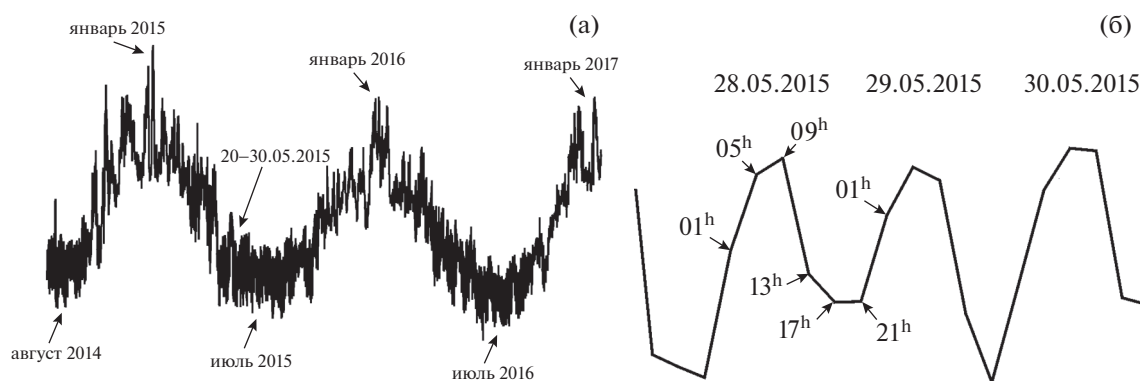


Рис. 2. Квазисинусоида (а), отражает высоту калибровочной ступеньки на интервале примерно 2.5 года. Ее вершины приходится на зимние месяцы, а минимумы на летние месяцы. В суточных изменениях (б) также видна квазисинусоидальная структура. Вершины этой структуры приходится на ночные часы и на утро, а минимумы — на дневные часы и на вечер. Метки времени на панели (б) отмечают московское время.

оценки плотностей потоков, учитывающие специфику наблюдений на антенной решетке, предназначенные для работы как с обычными, так и мерцающими радиосточниками, используются в ПРАО уже десятки лет [18].

На БСА ФИАН в качестве калибровочных источников обычно используются радиосточники с плотностью потока от 15–20 до 100 Ян. Эти источники в течение суток из-за ионосферных мерцаний имеют сдвиги наблюдаемых координат по прямому восхождению и склонению. Лучи диаграммы направленности имеют фиксированные направления на небе, и сдвиги координат постоянно изменяют отклик антенны на наблюдаемый радиосточник. Высота источника, выраженная в янских на еди-

ницу АЦП, то есть цена деления, меняется от сессии к сессии. В течение дня цена деления также меняется от одного калибровочного источника к другому. Поэтому нет возможности сделать точные поправки к наблюдаемой плотности потока калибровочного источника. В дополнение, как показано на рис. 2б, в течение дня само усиление на антенно-фидерном тракте может существенно измениться, и поэтому в используемую среднюю оценку цены деления, полученную по набору калибровочных источников, вмешиваются плохо учитываемые факторы, что приводит к общим погрешностям оценки плотности потока 15–20% [19]. При этом ожидаемые изменения плотности потока в метровом диапазоне длин волн из-за собственной переменности и переменности, вызванной рефракцией,

на межзвездной среде могут быть существенно меньше 20% для подавляющей части источников (см. ссылки во Введении). Так как погрешности оценок плотности потока сравнимы с исследуемым эффектом, обнаружение переменности затруднено. Поэтому нами испытан другой способ оценки плотности потока, ранее не использовавшийся для обработки данных, полученных на БСА ФИАН.

Как упоминалось выше, изменения высоты калибровочной ступеньки при постоянной температуре не превосходят 2–3%, поэтому высоту калибровочного и исследуемого источников можно привязать к высоте ступеньки. Пары источников нужно выбрать так, чтобы по прямому восхождению и склонению они были в пределах $\pm 15^\circ$ от средней координаты между двумя источниками, и тем самым возможные ионосферные сдвиги координат действовали одинаковым образом на оба источника, а “синусоидальные” изменения видимой плотности потока в единицах калибровочной ступеньки были синхронными. Фактически высокие летние температуры понижают усиление в антенно-фидерном тракте радиотелескопа, а низкие зимние температуры повышают это усиление. Изменение температуры в течение суток также понижает или повышает усиление в антенно-фидерных трактах. В процентном отношении эти изменения усиления одинаковы как для ступеньки, так и для радиоисточника, но в абсолютных значениях единиц АЦП они сильно расходятся.

Предлагаемая идея обработки пары “исследуемый/калибровочный” источники проста. Визуально в первичных записях подбираем возможного кандидата в калибровочные источники. Этот источник должен быть близок по координатам к исследуемому источнику. Так как проводится поиск возможной переменности, необходимо исключить переменность самого кандидата в калибровочные источники. Для исключения возможной переменности кандидаты просматриваются на элонгациях $25\text{--}40^\circ$ на предмет межпланетных мерцаний. Как известно, межпланетные мерцания, наблюдаемые в источнике в метровом диапазоне длин волн, указывают на существование в нем компактных компонент, имеющих угловой размер меньше $1''$. Если в калибровочном источнике есть компоненты, которые мерцают на межзвездной среде, то они же будут мерцать и на межпланетной плазме. Обратная ситуация наблюдается, когда у кандидата в калибровочные источники не наблюдаются межпланетные мерцания, или флуктуации плотности потока, вызванные межпланетными мерцаниями малы по сравнению с интегральной плотностью потока. В этом случае у источника не может быть межзвездных мерцаний, и данный кандидат в калибровочные источники подходит в пару к исследуемому источнику. Дополнительно для каждого

кандидата в калибровочные источники просматривались его РСДБ наблюдения, если таковые были, что позволило исключить “плохие” кандидаты.

Используя калибровочную ступеньку, выражаем плотность потока пары источников за данный день в единицах высоты ступеньки (то есть в промежуточных единицах, связанных с градусами температуры). По возможности избавляемся от помех, используя цифровые фильтры. Близость координат пар “калибровочный/исследуемый” источники позволяет надеяться на то, что изменения высоты ступеньки на интервале меньше одного или двух часов малы (см. рис. 2б). Так как есть сезонные изменения высоты ступеньки, и они имеют полугодовой период, можно усреднить оценки плотности потока источников, выраженные в единицах температур на полугодовых интервалах, и избавиться от сезонной зависимости. Усреднение на интервале порядка 180 дней уменьшит погрешности оценок плотности потока и, следовательно, можно будет проводить поиск переменности на малых изменениях наблюдаемой плотности потока. Плотность потока калибровочного источника должна быть константой, и отличие оценок этой плотности потока от среднего уровня на всем интервале, как ожидается, должно быть не больше погрешностей высоты калибровочных ступенек от шумового генератора (2–3%). Если предположить, что возможная разница плотностей потока, превышающая ошибки измерения, связана с глобальным изменением усиления в антенных трактах на полугодовых интервалах, то можно провести дополнительную компенсацию кривой блеска исследуемого источника, используя кривую блеска калибровочного источника. Сравнение кривых блеска исследуемого и калибровочного источников покажет как точность полученных оценок, так и возможные изменения плотности потока исследуемого радиоисточника на интервале больше года.

Проиллюстрируем пошаговую обработку на примере калибровочного источника V1007+417 ($4C+41.21$: $\alpha_{1950} = 10^h 07^m 26^s$; $\delta_{1950} = 41^\circ 47' 26''$), который был парой к исследуемому источнику V0821+394. На рис. 3а–д приведены последовательные стадии его обработки. По вертикальной шкале отложена интенсивность в промежуточных единицах температуры, по горизонтальной шкале — время в днях.

На рис. 3а видны сильные помехи. Средний уровень плотности потока источника соответствует примерно 165 промежуточным единицам. Также на рисунке можно увидеть слабовыраженную сезонную зависимость в наблюдаемой интенсивности.

На рис. 3б представлены данные после очистки от самых сильных помех. При уровне помех выше заданного значение помехи заменяется линейной аппроксимацией между оставшимися точками.

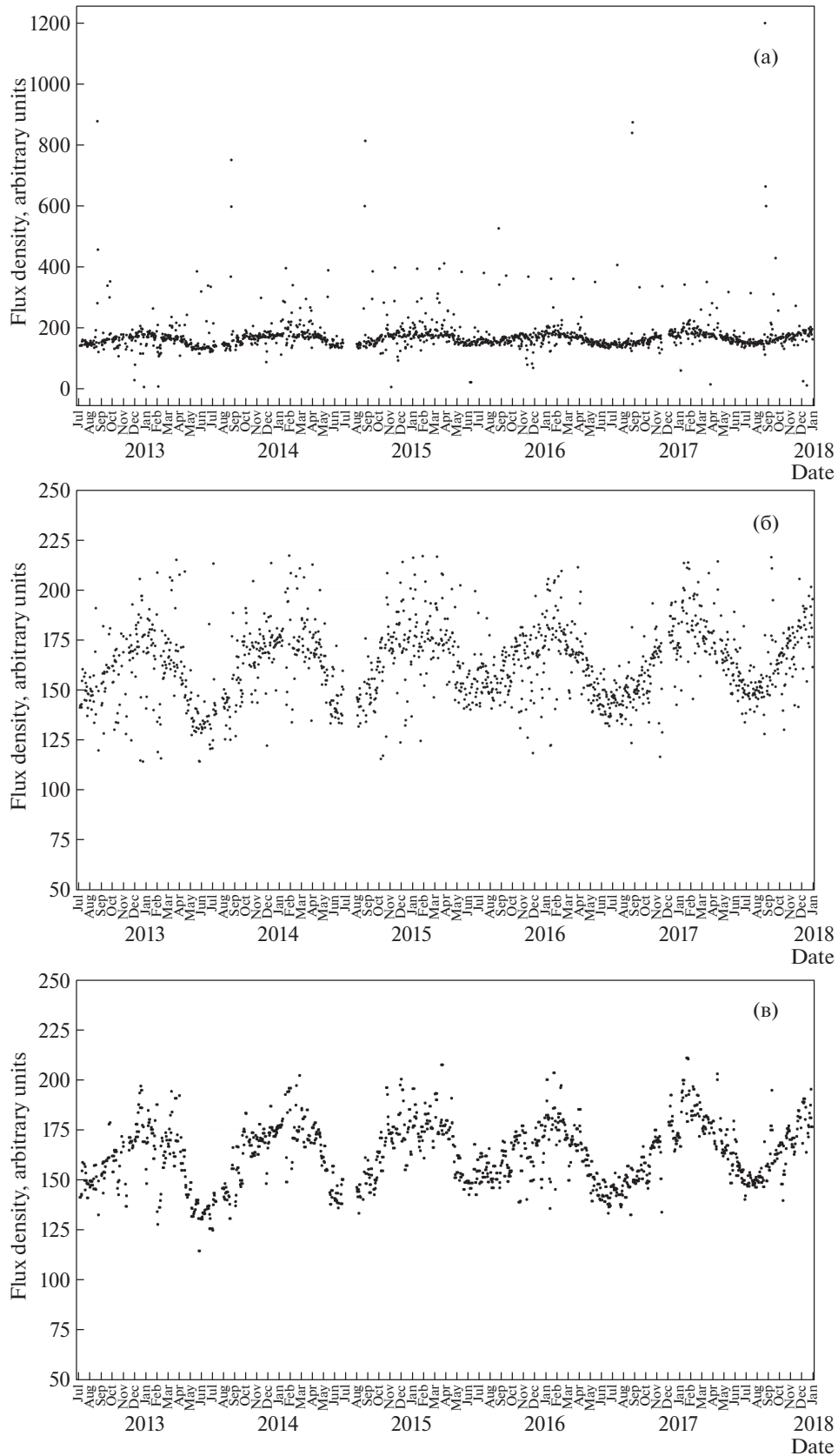


Рис. 3. а) Исходная интенсивность калибровочного источника 4C+41.21, выраженная в единицах высоты калибровочной ступеньки; б) интенсивность источника после очистки от сильных помех; в) интенсивность источника после прохождения через медианный фильтр; г) интенсивность источника после усреднения оценок интенсивности по полгода; д) кривые блеска калибровочных источников 4C+41.21 (круги), 3C 364 (звездочки), 3C 432 (треугольники), вертикальная шкала дана в процентах.

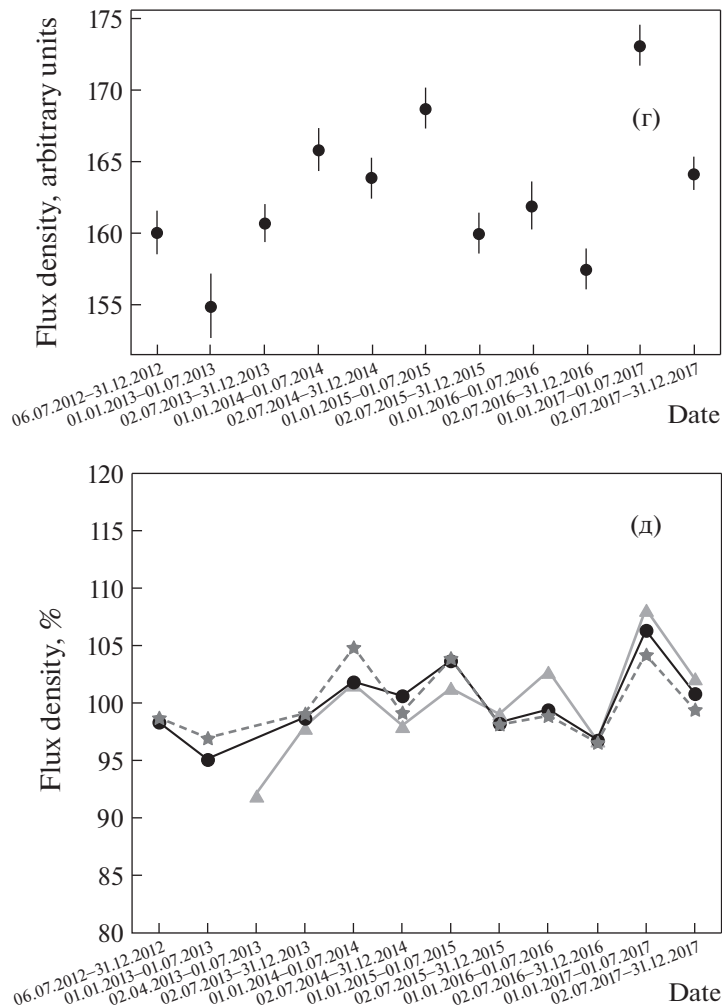


Рис. 3. Окончание.

Фильтр от сильных помех запускается дважды. В результате сильные помехи исчезают, и на записи (рис. 3б) хорошо видна сезонная зависимость, которая по форме, положению максимумов и минимумов в точности совпадает с зависимостью, полученной для калибровочной ступеньки (рис. 2а). Проверка показала, что в результате работы фильтра заменяются примерно 5–10% всех точек. Так как случаются пропуски наблюдений и дни, когда качество наблюдений слишком низкое, количество точек в этой зависимости меньше, чем количество дней, на которых проводится анализ данных. Поэтому на этом шаге пропущенные дни заменяются фиктивными точками, лежащими на линейную зависимость между точками с реальными данными.

На рис. 3в показана эта зависимость, проведенная через трехточечный медианный фильтр. Расстояние между точками фильтра может задаваться в программе и по умолчанию равно двум точкам. При таком шаге из зависимости исключаются любые выбросы длительностью меньше трех дней. На

записи все еще остаются помехи, представляющие собой выбросы вверх и вниз относительно видимой квазисинусоиды, но их количество кардинально уменьшилось. Оставшиеся выбросы говорят об увеличении или уменьшении наблюдаемой интенсивности на временном интервале больше 3 дней.

На рис. 3г показаны значения интенсивности в условных единицах и их среднеквадратичные отклонения, оставшиеся после усреднения данных по полугоду. Перед подсчетом среднеквадратичных отклонений в полугодовые данные вписывалась метод наименьших квадратов половина периода синусоиды, затем проводилось поточечное вычитание этой синусоиды из полученных данных. Из ряда оставшихся точек убирались все фиктивные, которые ранее добавлялись для корректной работы медианного фильтра. Таким образом, среднеквадратичные отклонения на полугодовом интервале определялись лишь по реальным точкам. Общее количество оставшихся точек на полугодовом интервале от 100 до 150 и, следовательно, точность оценки плотности потока улучшается в 10–12 раз.

Среднее значение плотности потока в промежуточных единицах для источника 4С+41.21 оказалось равным 162.8 на всем интервале наблюдений. Минимальное среднеквадратичное отклонение на полугодовых интервалах было 1.2 условной единицы, а максимальное отклонение 2.3 единицы. Таким образом, точность оценки плотности потока составляет примерно $\pm 1\%$. В то же время из рис. 3г видно, что усредненные за полгода значения плотности потока калибровочного источника имеют отклонения от среднего примерно $\pm 5\%$, что находится далеко за пределами посчитанных ошибок.

Мы предполагаем, что в первую очередь эти большие отклонения от среднего значения плотности потока связаны с состоянием распределенной системы усиления антенны. БСА ФИАН имеет 256 маломощных усилителей (МШУ) на входных трактах антенны и 16 усилителей на входах матриц Батлера, используемых для создания системы диаграммообразования. Поломки отдельных усилителей и длительные сроки их ремонта или замены могут приводить к такого рода отклонениям.

Однако, если есть глобальная причина, приводящая к видимым скачкам плотности потока в условных единицах температур на полугодовых интервалах, то она должна действовать независимо от того, на каких прямых восхождениях и склонениях находится калибровочный источник. На рис. 3д показано поведение кривых блеска трех калибровочных источников. О калибровочном источнике В1007+417 было сказано выше. Калибровочный источник В1754+377 (3С 364: $\alpha_{1950} = 17^{\text{h}}54^{\text{m}}03^{\text{s}}$; $\delta_{1950} = 37^{\circ}43'03''$) был парой к исследуемому источнику В1812+412, а калибровочный источник В2212+135 (3С 442: $\alpha_{1950} = 22^{\text{h}}12^{\text{m}}20^{\text{s}}$; $\delta_{1950} = 13^{\circ}35'28''$) был парой к В2247+140. Калибровочные источники В1754+377 и В2212+135 были обработаны так же, как В1007+417. Для удобства просмотра поведения кривых блеска всех трех источников для каждого из них вычислялось среднее значение интенсивности на интервале наблюдений, на это значение делились значения точек кривых блеска, и затем полученные значения умножались на 100. Таким образом, среднее значение интенсивности в условных единицах для каждой кривой блеска приравнивалось к 100%. Сделанная перенормировка позволяет на одном рисунке и в одном масштабе увидеть отклонения плотностей потоков в кривых блеска. Ошибки отклонений на полугодовых интервалах на рис. 3д не приводятся, чтобы не загромождать рисунок, но в целом для калибровочных источников В1754+377 и В2212+135 они такие же, как и для В1007+417.

Из рис. 3д видно, что качественное поведение кривых блеска всех трех калибровочных источников совпадает. Поэтому можно сделать поправку плотностей потока исследуемых источников,

предполагая, что плотность потока калибровочного источника является константой. Учитывая, что ошибки оценок плотности потока кривых блеска в целом не превосходят 1%, в долговременных рядах будет легко определяться разница в 3–4% между минимальными и максимальными значениями плотности потока для исследуемых источников, что и будет говорить об их переменности.

Обработка исследуемых источников была такой же, как и для калибровочных источников. Кривые блеска исследуемых источников В0821+394 (4С+39.23: $\alpha_{1950} = 08^{\text{h}}21^{\text{m}}37^{\text{s}}$; $\delta_{1950} = 39^{\circ}26'28''$), В1812+412 ($\alpha_{1950} = 18^{\text{h}}12^{\text{m}}47^{\text{s}}$; $\delta_{1950} = 41^{\circ}12'06''$) и В2247+140 (4С+14.82: $\alpha_{1950} = 22^{\text{h}}47^{\text{m}}57^{\text{s}}$; $\delta_{1950} = 14^{\circ}03'57''$) были получены в единицах высоты калибровочной ступеньки. Используя базу данных NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/classic/>), можно оценить ожидаемую плотность потока калибровочных источников на частоте наблюдений БСА ФИАН и пересчитать кривые блеска исследуемых источников в стандартных единицах плотности потока, то есть в янских. Существенная часть оценок плотности потока, представленных в NED, сделана при помощи интерферометрических систем с угловым разрешением порядка угловых минут или меньше. С другой стороны, оценку плотности потока на частоте 102 МГц можно извлечь из каталога, полученного на антенне БСА ФИАН (<http://astro.prao.ru/db/>), и, предполагая спектральный индекс $\alpha = 1$ ($S \sim \nu^{-\alpha}$), пересчитать плотность потока на частоту 111 МГц. В качестве калибровок брались протяженные (не мерцающие) радиоисточники, и, вероятно, для некоторых из них оценки плотности потока, полученные на той же самой антенне, будут более релевантными.

Для калибровочных источников оценки ожидаемой плотности потока на 111 МГц, интерполированные из спектра NED и экстраполированные из оценок каталога БСА, сильно расходятся. Так для В1007+417 ($S_{\text{NED}} = 8.9$ Ян; $S_{\text{BSA}} = 15.0$ Ян), В1754+377 ($S_{\text{NED}} = 8.3$ Ян; $S_{\text{BSA}} = 12.7$ Ян), В2212+135 ($S_{\text{NED}} = 28.2$ Ян; $S_{\text{BSA}} = 43.0$ Ян). Перевод нормированных на температуру единиц АЦП в янские дает большой разброс: 1 янский равен соответственно 25.4; 20.1; 20.6 условных единиц, исходя из плотностей потоков NED, и 14.9; 13.1; 11.7 условных единиц, исходя из плотностей потоков БСА. Очевидно, что столь большие отличия в цене деления могут приводить к систематическим ошибкам в пересчитанных кривых блеска исследуемых источников, хотя и не будут влиять на качественное поведение этих кривых. При получении оценок плотностей потока для кривых блеска было использовано усредненное значение 1 Ян = 17.6 условной единицы.

Таблица 1. Плотности потока исследованных компактных радиоисточников в янских

	B0821+394	B1812+412	B2247+140
06.07.2012–31.12.2012	4.66	5.34	–
01.01.2013–01.07.2013	4.83	5.55	3.06
02.07.2013–31.12.2013	5.40	5.63	3.77
01.01.2014–01.07.2014	5.40	5.68	3.67
02.07.2014–31.12.2014	5.13	5.51	4.04
01.01.2015–01.07.2015	4.78	5.32	3.85
02.07.2015–31.12.2015	4.33	5.22	3.90
01.01.2016–01.07.2016	4.39	5.43	3.77
02.07.2016–31.12.2016	4.34	5.29	4.31
01.01.2017–01.07.2017	4.47	5.53	3.87
02.07.2017–31.12.2017	4.85	5.46	4.25
Весь интервал	4.87	5.45	3.68

В табл. 1 в первой колонке даны полугодичные интервалы, на которых делалась оценка плотности потока. Наблюдения B2247+140 начались в апреле 2013 г., и соответствующий интервал был 02.04.2013–01.07.2013. В колонках 2–4 даны оценки плотности потока в янских на интервалах, приведенных в колонке 1. В последней строке приведена оценка средней плотности потока по всему интервалу наблюдений. Все оценки плотностей потока даны с учетом компенсации за кривую блеска соответствующих калибровочных источников. Типичная среднеквадратичная ошибка измерений оценок плотностей потока в табл. 1 не превышает 1%, что соответствует ± 0.05 Ян. Напомним также, что систематические ошибки могут изменить значения плотностей потоков в 1.5 раза.

Сравнение средних плотностей потока и отклонений от этого среднего значения показывает, что в процентном отношении отклонения для источника B0821+394 составляют 10%, для B1812+412 — 3%, для B2247+140 — 15%. Это однозначно говорит о долговременной переменности всех исследованных радиоисточников.

На рис. 4 приведены кривые блеска, построенные по значениям, приведенным в табл. 1. Светло-серым цветом показаны кривые блеска до компенсации за скачки кривых блеска у калибровочных источников, а черным цветом — после компенсации. Видно, что исправления кривых блеска исследуемых радиоисточников за компенсацию, полученную по калибровочным источникам, незначительные. Общие тренды, видимые в кривых блеска, не меняются.

Кривые блеска для источников B0821+394 и B1812+412 имеют явно выраженные максимумы и характерное время переменности у этих источников порядка 1.5 года. У источника B2247+140 характерное время переменности определить трудно, так как в кривой блеска наблюдаются явный подъем в 2013 г. и выход на плато. Явного уменьшения плотности потока, позволяющего дать оценку характерного времени переменности в кривой блеска, пока не видно.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано в табл. 1, наблюдаемые средние плотности потока на интервале 5.5 лет для $S_{0821+394} = 4.87$ Ян, $S_{1812+412} = 5.45$ Ян, $S_{2247+140} = 3.68$ Ян. Эти источники наблюдались ранее на БСА ФИАН на частоте 102.5 МГц в рамках исследований источников с плоскими спектрами. Были получены следующие оценки плотности потока интегрального и компактного компонентов: B0821+394 $S_{\text{int}} = 6.5 \pm 2$ Ян; $S_c = 2.5 \pm 0.6$ Ян; B1812+412 $S_{\text{int}} = 10 \pm 5$ Ян; $S_c = 1.7 \pm 0.8$ Ян; B2247+140 $S_{\text{int}} = 5.5 \pm 2$ Ян; $S_c = 2.2 \pm 0.3$ Ян. Оценки интегральной плотности на 111 МГц не противоречат оценкам на 102 МГц.

Источник B0821+394 был отобран в список источников MOJAVE [20], и на сайте <http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/sample.html> приведены 8 карт этого источника. Его наблюдения проводились на частоте 15 ГГц с угловым разрешением лучше 1 мс дуги на интервале времени 1995–2013 гг. На всех картах основной вклад в плотность

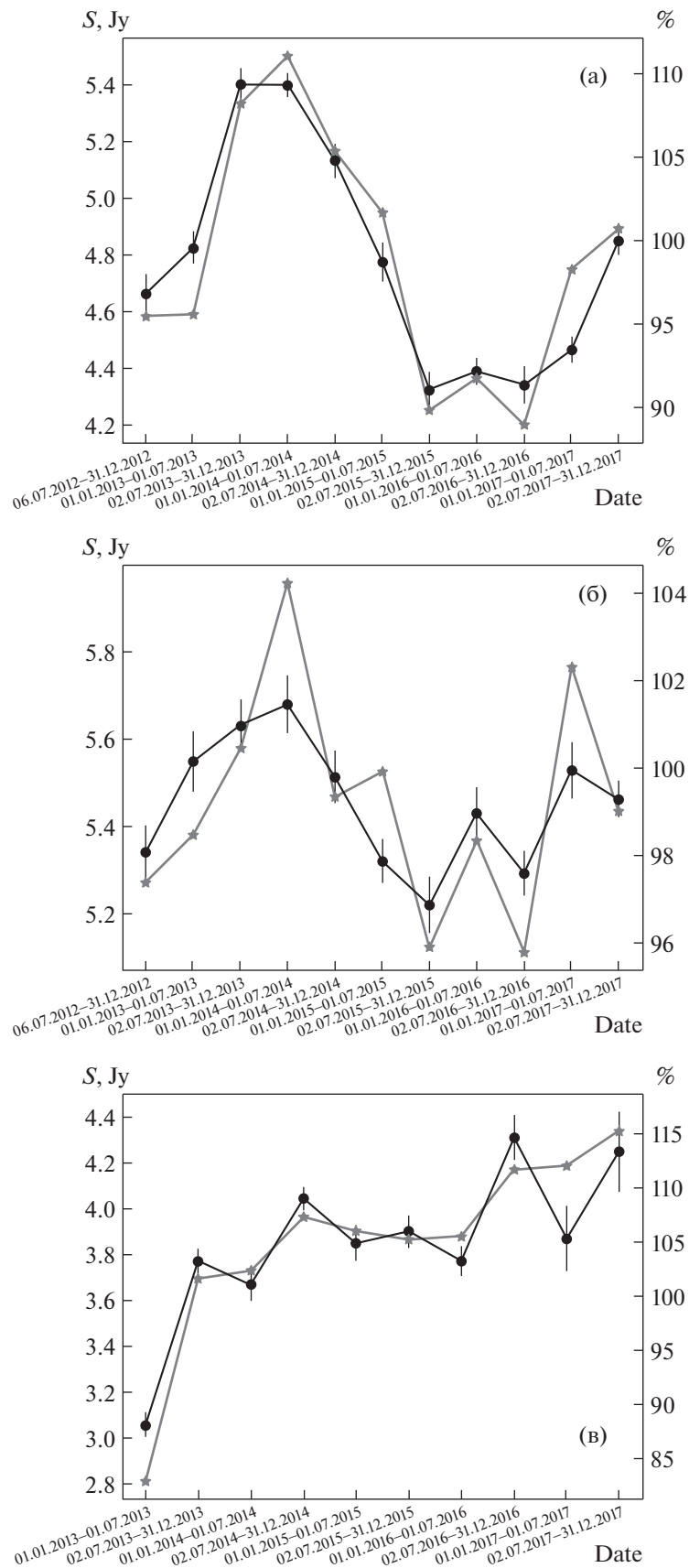


Рис. 4. Усредненные на полугодовых интервалах плотности потока источников B0821+394, B1812+412, B2247+140 (а, б, в). Левая вертикальная шкала в янских, правая вертикальная шкала в процентах, горизонтальная шкала — интервалы наблюдений.

потока вносит компонент, располагающийся на юго-востоке. Пиковая плотность потока в сессиях изменяется в 2 раза и, как правило, она больше 1 Ян. Размер этой компоненты порядка 1–2 мсек. Общий размер источника меньше 5 мс. Наблюдения на 5 ГГц [21], проведенные с близким угловым разрешением, показывают похожую картину.

У источника В1812+412 наблюдения с высоким угловым разрешением немногочисленны. Согласно работе [22] с РСДБ наблюдениями, проведенными на частоте 5 ГГц и с угловым разрешением порядка миллисекунды, источник состоит из трех компонентов. Больше 80% всей энергии приходит из западного компонента, имеющего угловые размеры 0.4×0.3 мс. Общая длина источника около 10 мс. Плотность потока от всех наблюдавшихся компонентов на дату наблюдений (11 июня 1993 г.) была 0.33 Ян.

Наблюдения В2247+140 противоречивы. Согласно ранним наблюдениям на 5 ГГц с угловым разрешением 100 мс и 1.5 мс [23], в источнике не наблюдается коррелированного потока на уровне, превышающем 100 мЯн. При этом интегральная плотность потока источника составляла 1.2 Ян. В то же время MERLIN наблюдения, проходившие на частоте 5 ГГц с угловым разрешением 90×39 мс [24], показали, что $2/3$ всей энергии с РСДБ карты приходит от компонента размером 18 мс. Плотность потока этого компонента 477 мЯн (пиковая плотность потока на карте 390 мЯн). Возможно, что явное противоречие между результатами этих наблюдений связано с сильной переменностью источника.

Если компактные компоненты, видимые на высоких частотах, продолжают существовать и на частоте 111 МГц, то могут наблюдаться рефракционные межзвездные мерцания всех трех источников. Так как характерные времена переменности источников порядка года, то их угловые размеры должны быть порядка десятков микросекунд. Детали таких размеров в РСДБ картах исследованных источников не отмечены. Самый маленький компонент наблюдается в источнике В1812+412. Он имеет размер около 100 микросекунд. Анализ возможных межзвездных мерцаний будет сделан в последующей работе.

Сделаем оценки яркостной температуры, исходя из возможной собственной переменности источников, используя стандартные формулы оценок яркостной температуры и размера источников (см., например, формулы 1–4 в работе [25]). Яркостные температуры для исследованных источников получаются порядка 10^{17} К. Столь высокие значения яркостной температуры, превышающей комптоновский предел на 5 порядков, говорят о том, что собственная переменность в этих источниках маловероятна.

Мы полагаем, что обнаруженная переменность связана с рефракционными межзвездными мерцаниями компактных компонентов источников. Наблюдения рефракционных межзвездных мерцаний, связанных с долговременной переменностью на масштабах лет, на настоящий момент времени — единственный путь обнаруживать сверхкомпактные источники, имеющие размеры порядка 10 мс в метровом диапазоне длин волн. Чтобы обеспечить такое угловое разрешение, интерферометрические системы должны иметь базы порядка нескольких десятков тысяч километров.

Сделаем грубую оценку количества радиоисточников, которые можно наблюдать при поиске долговременной переменности на БСА ФИАН. Переменность имеет смысл искать у источников, заведомо имеющих компактные компоненты. Удобный предварительный отбор таких источников можно сделать, используя их наблюдения методом межпланетных мерцаний. Как известно, межпланетные мерцания наблюдаются у источников с угловыми размерами меньше $1''$. У источников, имеющих компоненты размером в десятки угловых миллисекунд, межпланетные мерцания будут наблюдаться как мерцания точечного источника.

В 1993–1995 гг. на антенне БСА ФИАН был сделан обзор мерцающих источников на частоте 102.5 МГц [19] в площадке 7С обзора [26], проведенного на частоте 151 МГц с угловым разрешением около $1''$. Минимальные наблюдаемые плотности потока мерцающих радиоисточников на частоте 102 МГц были примерно 150 мЯн, минимальные интегральные плотности потока источников в 7С обзоре были около 90 мЯн на 151 МГц (или 135 мЯн при переводе этой плотности потока на частоту 102 МГц со спектральным индексом единица). В обзоре на БСА ФИАН было зарегистрировано 125 компактных (мерцающих) источников, в 7С обзоре в этой же площадке зарегистрировано 1338 источников. С учетом близкой чувствительности обзоров можно утверждать, что примерно 10% всех источников, наблюдаемых на низких частотах, имеют компактные компоненты, которые можно обнаружить на БСА ФИАН.

В электронной версии каталога обзора, сделанного на радиотелескопе БСА ФИАН (<http://astro.prao.ru/db/>), на доступных для мониторинга склонениях источников находится 6414 дискретных радиоисточников, обнаруженных при угловом разрешении $0.5^\circ \times 1^\circ$. Если 10% из них мерцает, то для исследований переменности доступно 640 компактных источников. При этом общее количество мерцающих радиоисточников, наблюдаемых в мониторинговых наблюдениях, существенно больше. Плотность мерцающих источников на небе близка к одному источнику на квадратный градус [19, 27].

Поэтому в течение года в мониторинговой площадке ($-9^\circ < \delta < +42^\circ$) на БСА ФИАН наблюдается примерно 15 000 мерцающих источников. У подавляющей части этих источников нельзя выделить интегральную плотность потока из-за эффекта путаницы протяженных источников, который равен примерно 1 Ян, в то время как слабые мерцающие источники, наблюдаемые на БСА ФИАН, имеют плотность потока 100 мЯн. Для исследования долговременной переменности таких источников нужно разрабатывать особую методику обработки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены ряды наблюдений для трех радиоисточников с плоскими спектрами на частоте 111 МГц и на интервале времени 5.5 лет. Разработанная система калибровки наблюдений с использованием калибровочной ступеньки позволила определить интегральную плотность потока с точностью 1% от интегральной плотности потока на полугодовых интервалах. Долговременная переменность на масштабе 1.5–2 года связанная, по-видимому, с рефракционными межзвездными мерцаниями, обнаружена у источников В0821+394 и В1812+412. У источника В2247+140 также наблюдается переменность, но характерное время переменности на интервале 5.5 лет не определено.

Показано, что в мониторинговой площадке может находиться не менее 500 компактных источников, у которых можно провести поиск долговременной (от 1.5 до 5.5 лет) переменности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансировании проекта РАН КП 19-270 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность Л.Б. Потаповой за помощь с оформлением рисунков, Г.Э. Тюльбашевой за создание вспомогательных программ обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. W. Hunstead, *Astrophys. Lett.* **12**, 193 (1972).
2. I. S. Shklovsky, *Nature* **206**, 176 (1965).
3. H. van der Laan, *Nature*, **211**, 1131 (1966).
4. W. D. Cotton, *Astrophys. J. Supp.* **32**, 467 (1976).
5. C. Fanti, R. Fanti, A. Ficarra, F. Mantovani, L. Padrielli, K. W. Weiler, and B. C. Siegmann, *Astron. and Astrophys. Supp.* **45**, 61 (1981).
6. O. B. Slee, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **235**, 1313 (1988).
7. M. M. McGilchrist and J. M. Riley, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **246**, 123 (1990).
8. L. Padrielli, M. F. Aller, H. D. Aller, C. Fanti, et al., *Astron. and Astrophys. Supp.* **67**, 63 (1987).
9. N. Ya. Shapirovskaya, *Sov. Astron.* **22**, 544 (1978).
10. J. D. Rickett, W. A. Coles, and G. Bourgois, *Astron. and Astrophys.* **134**, 390 (1984).
11. A. P. Marscher and W. K. Gear, *Astrophys. J.* **298**, 114 (1985).
12. K. J. Mitchell, B. Dennison, J. J. Condon, D. R. Altschuller, H. E. Payne, S. L. O'Dell, and J. J. Broderick, *Astrophys. J. Supp.* **93**, 441 (1994).
13. В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко и др., *Астрон. журн.* **93**, 1045 (2016).
14. С. А. Тюльбашев, В. С. Тюльбашев, В. В. Орешко и С. В. Логвиненко, *Астрон. журн.* **93**, 177 (2016).
15. С. А. Тюльбашев, В. С. Тюльбашев, В. М. Малофеев и др., *Астрон. журн.* **95**, 68 (2018).
16. S. A. Tyul'bashev and P. Augusto, *Astron. and Astrophys.* **439**, 963 (2005).
17. V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei, I. A. Subaev, and K. A. Lapaev, *Solar Phys.* **265**, 277 (2010).
18. В. С. Артюх, *Астрон. журн.* **58**, 208 (1981).
19. В. С. Артюх и С. А. Тюльбашев, *Астрон. журн.* **73**, 669 (1996).
20. M. L. Lister, M. F. Aller, H. D. Aller, D. C. Homan, K. I. Kellermann et al., *Astron. J.* **146**, 120 (2013).
21. J. F. Helmboldt, G. B. Taylor, S. Tremblay, C. D. Fassnacht, R. C. Walker, et al., *Astrophys. J.* **658**, 203 (2007).
22. D. R. Henstock, I. W. Browne, P. N. Wilkinson, G. B. Taylor, R. C. Vermeulen, et al., *Astrophys. J. Supp.* **100**, 1 (1995).
23. H. Hirabayashi, E. B. Fomalont, S. Horiuchi, J. E. J. Lovell, G. A. Moellenbrock, et al., *Proc. Astron. Soc. Jap.* **52**, 997 (2000).
24. P. Augusto, P. N. Wilkinson, and I. W. A. Browne, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **299**, 1159 (1998).
25. O. B. Slee, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **209**, 215 (1984).
26. M. M. McGilchrist, J. E. Baldwin, J. M. Riley, D. J. Titterton, E. M. Waldram, and P. J. Warner, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **246**, 110 (1990).
27. В. С. Артюх, С. А. Тюльбашев и Е. А. Исаев, *Астрон. журн.* **75**, 323 (1998).