

УДК 524.354.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПУЛЬСАРА В0301+19 (J0304+1932) НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2019 г. А. Н. Казанцев^{1*}, В. А. Потапов^{1**}, Г. Б. Сафронов^{2,1***}

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

²Российский научный центр “Курчатовский институт”, Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), Москва, Россия

Поступила в редакцию 23.07.2018 г.; принята в печать 13.09.2018 г.

Проанализированы результаты наблюдений пульсара В0301+19 (J0304+1932), проведенных на Большой сканирующей антенне (БСА) Пушчинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО АКЦ ФИАН) на частоте 111 МГц в 2012–2017 гг. Нами была обнаружена регулярная генерация мощных индивидуальных импульсов на долготе обоих компонентов среднего профиля данного пульсара, которые были классифицированы как гигантские импульсы (ГИ). Наиболее мощный из импульсов имел пиковую плотность потока ≈ 935 Ян и энергию в импульсе ≈ 6930 Ян · мс. Наибольшее зарегистрированное превышение плотности потока относительно среднего профиля в сеансе составляет 93.7. Средняя ширина самого мощного ГИ на 50% интенсивности составила 2.8 мс при ширине соответствующего компонента среднего профиля около 10 мс. Распределения аномально мощных импульсов по пиковой плотности потока и энергии в импульсе имеют сложный характер, который не может быть сведен для всего диапазона их значений только к логнормальной или только к степенной модели.

DOI: 10.1134/S000462991902004X

1. ВВЕДЕНИЕ

Из более чем 2500 радиопульсаров на сегодняшний день известны только 15, генерирующих гигантские радиоимпульсы (ГИ) — кратковременные всплески плотности потока радиоизлучения в импульсе пульсара. Впервые феномен генерации ГИ был обнаружен у пульсара в Крабовидной туманности В0531+21 [1]. Проведенный позднее более тщательный анализ индивидуальных импульсов данного пульсара, впервые опубликованный в работе [2], обозначил ряд критериев, основываясь на которых можно отнести тот или иной индивидуальный импульс к классу ГИ (в оригинальной статье был использован термин “Jumbo Pulses”): (1) локализация на долготах главного импульса или интеримпульса (следует отметить, что в случае В1937+21 ГИ концентрируются на задней кроме основного профиля и (или) интеримпульса [3, 4]); (2) высокая пиковая плотность потока радиоизлучения, превышающая пиковую плотность потока среднего за сеанс импульса в 30 и более

раз (альтернативным, “слабым” критерием является определение ГИ как импульса с энергией, превышающей энергию среднего импульса более чем в 10 раз); (3) малая длительность относительно длительности среднего импульса; (4) степенное распределение ГИ по пиковой плотности потока.

Проводимые с 1970-х годов в различных диапазонах радиочастот (от 40 до 2500 МГц) наблюдательные программы, нацеленные на поиск индивидуальных импульсов с вышеперечисленными критериями, позволили обнаружить у ряда ранее известных радиопульсаров импульсы, классифицированные авторами как ГИ [5–20]. Для “классических” генераторов ГИ — пульсаров В0531+21 и В1937+21 — типична исключительно малая длительность (наносекунды) и высокая пиковая плотность потока, что приводит к тому, что ГИ этих пульсаров оказались астрофизическим феноменом с самой большой яркостью температурой среди галактических источников (см., напр., [4, 21]). ГИ остальных пульсаров имеют более скромные значения пиковой плотности потока и превышают средний импульс в сеансе лишь в несколько десятков раз. Тем не менее они удовлетворяют основным критериям, перечисленным выше, и даже по единственному критерию относительной пиковой

*E-mail: kaz.prao@bk.ru

**E-mail: potap@prao.ru

***E-mail: grigorybs@gmail.com

плотности потока индивидуальных импульсов эти пульсары могут быть достаточно четко выделены среди обычных, так как регулярная генерация импульсов, превышающих средний профиль по амплитуде более чем в 10 раз (см., напр., [22, 23]) — явление нетипичное для подавляющего большинства пульсаров.

Попытки найти закономерность в сочетании параметров пульсаров, которая позволила бы надежно предсказывать появление у них ГИ, пока что не увенчались успехом. Для иллюстрации разброса наблюдаемых параметров можно отметить, что наиболее мощные ГИ генерируются двумя пульсарами с резко отличающимися характеристиками: молодым нестабильным изолированным пульсаром в Крабовидной туманности и “рецикленным” быстровращающимся высокостабильным изолированным миллисекундным пульсаром B1937+21. Возможности применения статистических методов для выявления закономерностей в сочетании параметров пульсаров с ГИ очевидно ограничены недостаточной выборкой последних. Тем не менее, как ранее было продемонстрировано нами (см. [16, табл. 1]), все пульсары с ГИ достаточно уверенно разбиваются на две подгруппы, к одной из которых относятся пульсары с “классическими” ГИ — с большими значениями магнитного поля на световом цилиндре B_{LC} порядка 10^5 – 10^6 Гс, наблюдаемые в широком диапазоне радиочастот, а ко второй — пульсары с величиной B_{LC} от десятков до сотен Гс, наблюдавшиеся (за исключением PSR J0529–6652 в Большом Магеллановом Облаке) только на низких, до 111 МГц, радиочастотах.

С целью исследования феномена ГИ в ПРАО АКЦ ФИАН нами были организованы две программы наблюдений на выборке ярких радиопульсаров северного неба: (1) программа мониторинга ранее известных пульсаров с ГИ, (2) программа поиска пульсаров, генерирующих ГИ. Критериями отбора объектов для первого цикла программы поисковых наблюдений служили: возможность уверенного наблюдения на радиотелескопе БСА (склонение $> -10^\circ$); величина меры дисперсии пульсара, не приводящая к сильному искажению импульса в одном частотном канале приемника; плотность потока радиоизлучения, достаточно большая для уверенного наблюдения среднего профиля пульсара за сеанс. Как один из важных результатов первой поисковой программы, можно отметить обнаружение ГИ от пульсара B1237+25 [16].

Далее в статье рассматриваются результаты исследования аномально мощных индивидуальных импульсов у наблюдавшегося в рамках программы поиска пульсара V0301+19 (J0304+1932).

2. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Наблюдения пульсара проводились на Большой сканирующей антенне (БСА) ПРАО АКЦ ФИАН на центральной частоте 111 МГц (рабочий диапазон частот радиотелескопа 109–113 МГц). Эффективная площадь (в зените) в период проведения наблюдений составляла около 20 000 м², наблюдения проводились в одной линейной поляризации в направлении “восток-запад”, ширина диаграммы направленности на уровне 1/2 интенсивности в Е-плоскости 0.83° , в В-плоскости от 0.37° (при направлении в зенит) до 0.73° (при направлении на высоту в 30°).

В период с ноября 2012 г. по декабрь 2016 г. нами было проведено около 500 сеансов наблюдений, данные 275 из них, в которых наблюдался средний профиль пульсара, были использованы для последующей обработки. Наблюдения проводились при прохождении пульсара через центральную часть диаграммы направленности телескопа (по уровню 0.5), время прохождения составляло около 3.5 мин, за которые в каждом сеансе регистрировалось 146 периодов пульсара. Таким образом, всего было накоплено 40 150 периодов пульсара. Был использован режим записи индивидуальных импульсов с постоянной времени $\tau = 1.2288$ мс. В качестве регистратора использовался 512-канальный цифровой пульсарный приемник с полосой пропускания 2.5 МГц (5 кГц на канал, диапазон рабочих частот приемника 109.584–112.084 МГц), из 512 каналов которого для дальнейшей обработки брались 460 (крайние каналы отсекались из-за завала амплитудно-частотной характеристики).

Первоначально аномально мощные импульсы были обнаружены нами при тестировании программы pulsarFinder (Г.Б. Сафронов, ПРАО АКЦ ФИАН) [24], предназначенной для поиска и первичного анализа радиоизлучения пульсаров и транзиентов. В ходе обработки результатов наблюдений пульсара V0301+19 за ноябрь 2012 г., включавшей в себя фильтрацию импульсных помех в частотной и временной области и суммирование сигнала в каналах с учетом дисперсионного запаздывания для получения индивидуальных и среднего за сеанс импульсов, наше внимание привлекли существенные вариации плотности потока среднего импульса. Просмотр записей индивидуальных импульсов показал, что пульсаром регулярно генерируются одиночные импульсы с пиковой плотностью потока, существенно (более чем в 10 раз) превышающей среднюю в сеансе. Это побудило нас провести более тщательный анализ архивных данных за весь период наблюдений данного пульсара и включить его в дальнейшую поисковую программу.

На втором этапе обработки нами была использована программа PulseViewer (С.В. Логвиненко, ПРАО АКЦ ФИАН), а для поиска аномальных импульсов и их дальнейшего статистического анализа пакет программ на языке Python и Wolfram Mathematica (А.Н. Казанцев, В.А. Потапов). Так же, как и на первом этапе, для каждого сеанса наблюдений в отдельности производились компенсация меры дисперсии, фильтрация импульсных помех в частотной и временной областях. Далее производились вычитание нулевого уровня (фона), формирование динамического среднего профиля пульсара (сложение и усреднение индивидуальных импульсов за сеанс) и анализ индивидуальных импульсов. Из всего массива данных выбирались импульсы, превышающие порог в $4\sigma_{ш}$ ($\sigma_{ш}$ — среднеквадратичное отклонение шумов, вычисленное вне области импульсного излучения пульсара), и лежащие на долготах среднего профиля. Предварительные результаты наблюдений аномально мощных импульсов пульсара В0301+19 по данным ноября-декабря 2012 г. были приведены нами в [15].

Для последующего статистического анализа рассчитывались фаза и ширина импульса на 50% интенсивности, пиковая плотность потока импульсов в единицах среднего за сеанс импульса и в единицах АЦП (аналого-цифрового преобразователя), отношение сигнал/шум импульса в сеансе, энергия в импульсе в единицах АЦП и в единицах энергии среднего за сеанс импульса.

Для вычисления значений абсолютной плотности потока индивидуальных и средних импульсов использовалась калибровочная ступенька (генератор шума). Оценка плотности потока производилась по формуле

$$S_{u[\text{Ян}]} = D_1 S_{\text{adc}}, \quad (1)$$

$$D_1 = \frac{2kT_{ш}}{A_0 S_{ш,\text{adc}}}, \quad (2)$$

где $S_{u[\text{Ян}]}$ — оценка пиковой плотности потока импульса без исправления за форму диаграммы направленности антенны в янских, $T_{ш} = 2100 \text{ К}$ — абсолютная температура шума, генерируемого в калибровочной ступеньке, $A_0 = 20\,000 \pm \pm 1300 \text{ м}^2$ — эффективная площадь антенны в период наблюдения в направлении зенита, S_{adc} — пиковая плотность потока импульса в единицах АЦП, $S_{ш,\text{adc}}$ — высота калибровочной ступеньки в единицах АЦП, k — постоянная Больцмана.

Для корректного расчета пиковой плотности потока S в Ян и энергии в импульсе E в Ян · мс необходимо учесть ряд поправочных коэффициентов K_y , связанных с особенностями формирования диаграммы направленности (ДН) антенны БСА:

$$K_\alpha = K_\alpha(x) = \text{Sinc}^{-2}(x), \quad (3)$$

$$K_{I\alpha} = K_{I\alpha} = 2x_{50} \left(\int_{-x_{50}}^{x_{50}} \text{Sinc}^2(x) dx \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$K_1 = K_1(z) = 1/\cos(z), \quad (5)$$

$$K_2 = K_2(\delta, \nu) = P_{m,\text{max}}(\delta, \nu)/P_m(\delta, \nu), \quad (6)$$

$$K_3 = K_3(\delta, \nu) = P_{\text{max}}(\delta, \nu)/P(\delta, \nu), \quad (7)$$

$$K_4 = K_4(\delta, \nu) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_{m,\text{max}}(\delta, \nu) d\delta / \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_m(\delta, \nu) d\delta, \quad (8)$$

где K_α — поправочный коэффициент на прохождение источника через ДН по прямому восхождению; x — значение отклонения текущего положения источника от максимума ДН в радианах; $K_{I\alpha}$ — поправочный коэффициент в оценку плотности потока и энергии среднего профиля за прохождение через 1/2 ДН антенны по интенсивности; $x_{50} \approx 1.392$ — значение x на 1/2 ДН; z — зенитное расстояние источника; K_1 — коэффициент, связывающий геометрическую эффективную площадь антенны $A_{\text{эфф}}$ в направлении z с эффективной площадью в зените $A_{\text{эфф}} = A_0/K_1$, данное приближение хорошо работает до $z \approx 55^\circ$; K_2 — поправка за непопадание в максимум диаграммы направленности m -го дифракционного лепестка антенны на центральной частоте приема ν ; $P_m(\delta, \nu)$ и $P_{m,\text{max}}(\delta, \nu)$ — диаграмма направленности m -го дифракционного лепестка по мощности в направлении на источник и в максимуме ближайшего к источнику дифракционного лепестка соответственно; K_3 — поправка за огибающую диаграммы направленности одного полотна антенны; $P(\delta, \nu)$ и $P_{\text{max}}(\delta, \nu)$ — диаграммы направленности одного полотна антенны по мощности в направлении на источник и ее максимум соответственно; K_4 — поправка за уменьшение эффективной площади антенны на краях частотного диапазона приемника из-за непопадания в максимум дифракционного лепестка, δ_1 и δ_2 — склонения, соответствующие максимумам m -го дифракционного лепестка диаграммы направленности антенны на крайних (граничных) частотах полосы приема.

Тогда выражения для плотностей потока и энергии в импульсе запишутся как:

$$S = D_1 K_\alpha K_1 K_2 K_3 K_4 S_{\text{adc}}, \quad (9)$$

$$S_a = (K_\alpha S_{\text{adc}})/(K_{I\alpha} S_{\text{ap,adc}}), \quad (10)$$

$$E = D_1 K_\alpha K_1 K_2 K_3 K_4 \sum_{i_l}^{i_r} I_{\text{adc}} \Delta\tau, \quad (11)$$

$$E_a = \frac{K_\alpha \sum_{i_l}^{i_r} I_{\text{adc}}(i)}{K_{I\alpha} \sum_{i_l}^{i_r} I_{\text{ap,adc}}(i)}, \quad (12)$$

где S — пиковая плотность потока индивидуального импульса в абсолютных единицах (Ян); S_a — пиковая плотность потока в единицах среднего за сеанс импульса; S_{adc} — пиковая плотность потока индивидуального импульса в отсчетах АЦП; $S_{\text{ap,adc}}$ — пиковая плотность потока среднего за сеанс импульса в отсчетах АЦП; E — энергия индивидуального импульса в абсолютных единицах (Ян · мс); E_a — энергия индивидуального импульса в единицах энергии среднего за сеанс импульса $\langle E \rangle$; $I_{\text{adc}}(i)$, $I_{\text{ap,adc}}(i)$ — плотности потока в единицах АЦП i -го отсчета на индивидуальном и среднем за сеанс импульсе соответственно; i_l , i_r — левая и правая границы импульса; $\Delta\tau$ — постоянная времени в сеансе (мс). Энергия в индивидуальном импульсе определялась его интегрированием в пределах левой и правой границ среднего за сеанс импульса.

Границы импульса определялись кросс-корреляцией среднего за сеанс импульса с шаблоном, приведенным к нулевому уровню сглаженным средним импульсом с высоким отношением сигнал—шум, ограниченным с обеих сторон в пределах устойчивого выхода сигнала на шумовую дорожку. При этом величины i_l , i_r — отсчеты на импульсе, совпадающие с первой и последней точками наложенного шаблона. Отметим, что, вообще говоря, этот метод расчета энергии приводит к распределению, качественно отличающемуся от распределения по плотностям потока.

Коэффициенты $K_2 - K_4$ могут быть оценены по формулам для расчета диаграммы направленности антенны БСА из [25]. Нами были использованы табулированные значения для K_2 , K_3 (руководство по антенне БСА-1), а оценки поправки в полосе для K_4 взяты из [26]. Значения коэффициентов составили:

$$K_{I\alpha} \approx 1.23, \quad K_1 \approx 1.22, \quad K_2 \approx 1.92,$$

$$K_3 \approx 1.11, \quad K_4 \approx 1.4, \quad D_1 \approx 0.92 \text{ Ян/отсчет.}$$

Среднеквадратичные отклонения (СКО) плотности потоков, вызванных флуктуациями эффективной площади антенны и коэффициента усиления приемника за время наблюдений, были оценены нами по вариациям $\sigma_{\text{ш}}$ и $S_{\text{ш,adc}}$ на годовом интервале как $\approx 10\%$. СКО для произведения коэффициентов K_y была взята $\approx 15\%$ [26]. Таким образом, суммарное СКО абсолютной плотности потока, вызванное этими эффектами, составляет, в предположении их статистической независимости, около 18%, что совпадает со сделанной нами ранее в [16] оценкой.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пульсар В0301+19 является изолированным секундным пульсаром с относительно большой

Таблица 1. Параметры пульсара В0301+19 (J0304+1932) согласно [27, 28]

Параметр	Значение
Эпоха, MJD	49289.00
α	03 ^h 04 ^m 33 ^s .115(16)
δ	+19°32'51''.4(8)
P , с	1.387584446262(3)
\dot{P} , 10^{-15} с/с	1.295235(2)
DM , пк см ⁻³	15.65677(35)
RM , рад/м ²	-8.3(3)
τ_{sc} , 10^{-8} с	6.070(3)
$W50$, мс	58.4(1)
$W10$, мс	73.4(1)
$S1400$, мЯн	3(1)
$S400$, мЯн	27(3)
$S111^*$, мЯн	350(70)
D^* , кпс	0.74(1)
B_{LC}^* , Гс*	4.76(1)

Примечание. В таблице приведены: Эпоха — эпоха периода и координат в модифицированных юлианских днях, α — прямое восхождение, δ — склонение, P — период собственного вращения пульсара, \dot{P} — первая производная периода по времени, DM — мера дисперсии, RM — мера вращения, τ_{sc} — уширение импульса из-за межзвездного рассеяния на частоте 1 ГГц, $W10$, $W50$ — ширины среднего профиля на 10% и 50% интенсивности, $S1400$, $S400$, $S111$ — плотность потока радиоизлучения от пульсара на частотах 1400, 400 и 111 МГц, D — оценка расстояния до пульсара в рамках модели распределения электронной плотности в Галактике YMW16 [29], B_{LC} — величина магнитного поля на световом цилиндре, символом * обозначены вычисляемые величины. В скобках даны оценки стандартного отклонения от среднего значения величин (последние значащие числа).

интегральной плотностью потока (входит в число 150 наиболее мощных пульсаров) и с малым значением магнитного поля на световом цилиндре (основные параметры пульсара, взятые из [27, 28], приведены в табл. 1). Насколько нам известно, тщательный анализ флуктуаций пиковой плотности потока данного пульсара ранее не проводился.

В ходе обработки результатов наблюдений нами были обнаружены мощные индивидуальные импульсы, которые с достаточной степенью уверенности можно характеризовать как ГИ. В 40 150 наблюдавшихся периодах пульсара было зарегистрировано 3160 импульсов, превышающих порог в 4 $\sigma_{\text{ш}}$ на долготях среднего профиля. Количество индивидуальных импульсов, пиковая

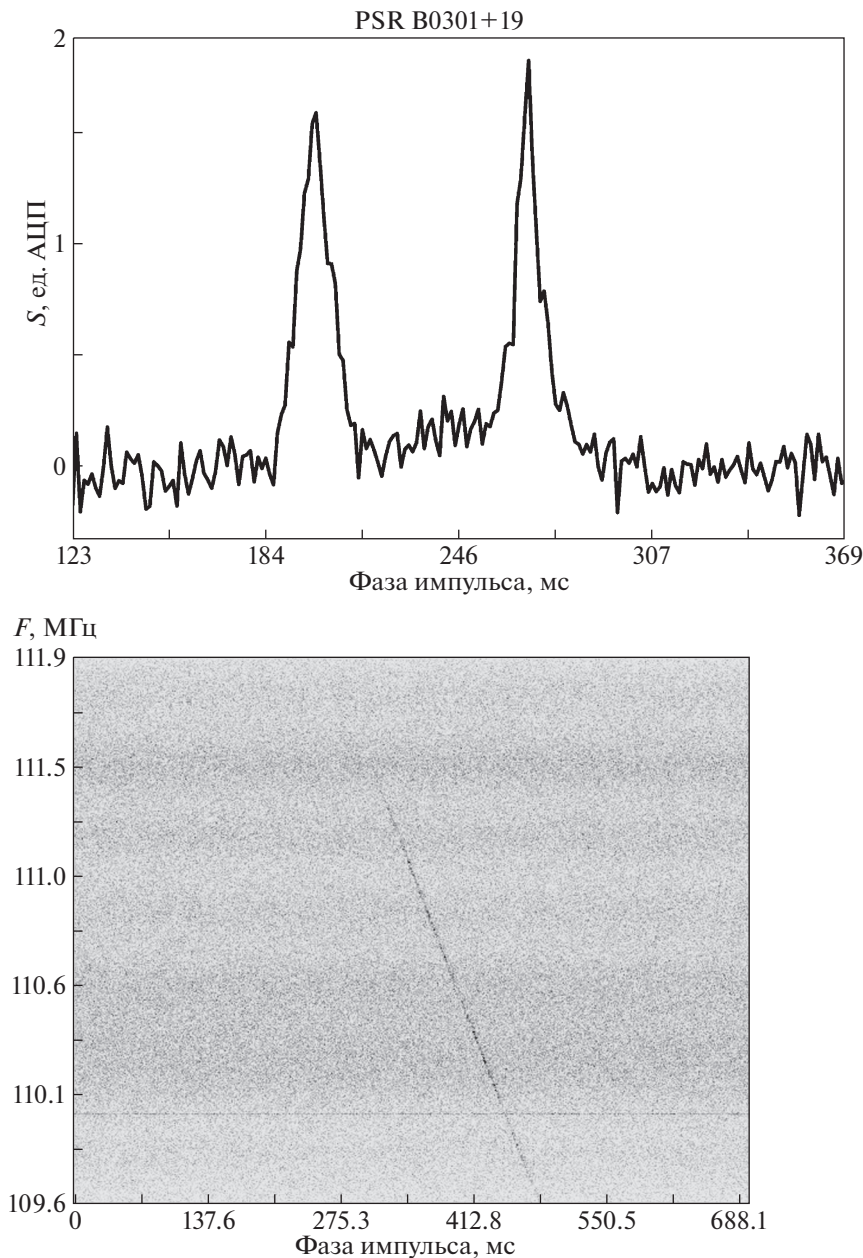


Рис. 1. Вверху — средний за сеанс профиль пульсара B0301+19. Внизу — динамический спектр ГИ в сеансе 16.05.2018, по оси абсцисс — фаза импульса в мс, по оси ординат — частоты каналов анализатора спектра (цифрового пульсарного приемника). Затухание сигнала в полосе частот обусловлено влиянием эффекта фарадеевского вращения при наблюдении линейно поляризованного импульса в одной линейной поляризации антенны (поворот плоскости поляризации в полосе частот ≈ 2.3 рад).

плотность которых в 30 раз превысила аналогичный параметр среднего за сеанс (динамического) профиля $S_{ар}$, составило 80 (2.53% от всех зарегистрированных импульсов и примерно один импульс на каждые 500 наблюдавшихся периодов), из них: $> 40S_{ар}$ — 31 импульс, $> 60S_{ар}$ — 8 импульсов. Наибольшее превышение по пиковой плотности потока над динамическим средним профилем было зарегистрировано нами 17.04.2014 и составило

$93.7S_{ар}$. Длительность самого мощного импульса составила 5 мс на уровне 0.1 от пиковой плотности потока и 2.8 мс на уровне 0.5, что в 3.6 раза меньше ширины соответствующего (второго) компонента профиля. Его плотность потока по абсолютному значению составила 935 ± 170 Ян. Максимальная зарегистрированная энергия в импульсе за время наблюдений — 6930 ± 1250 Ян · мс. Средний за сеанс профиль пульсара и динамический спектр

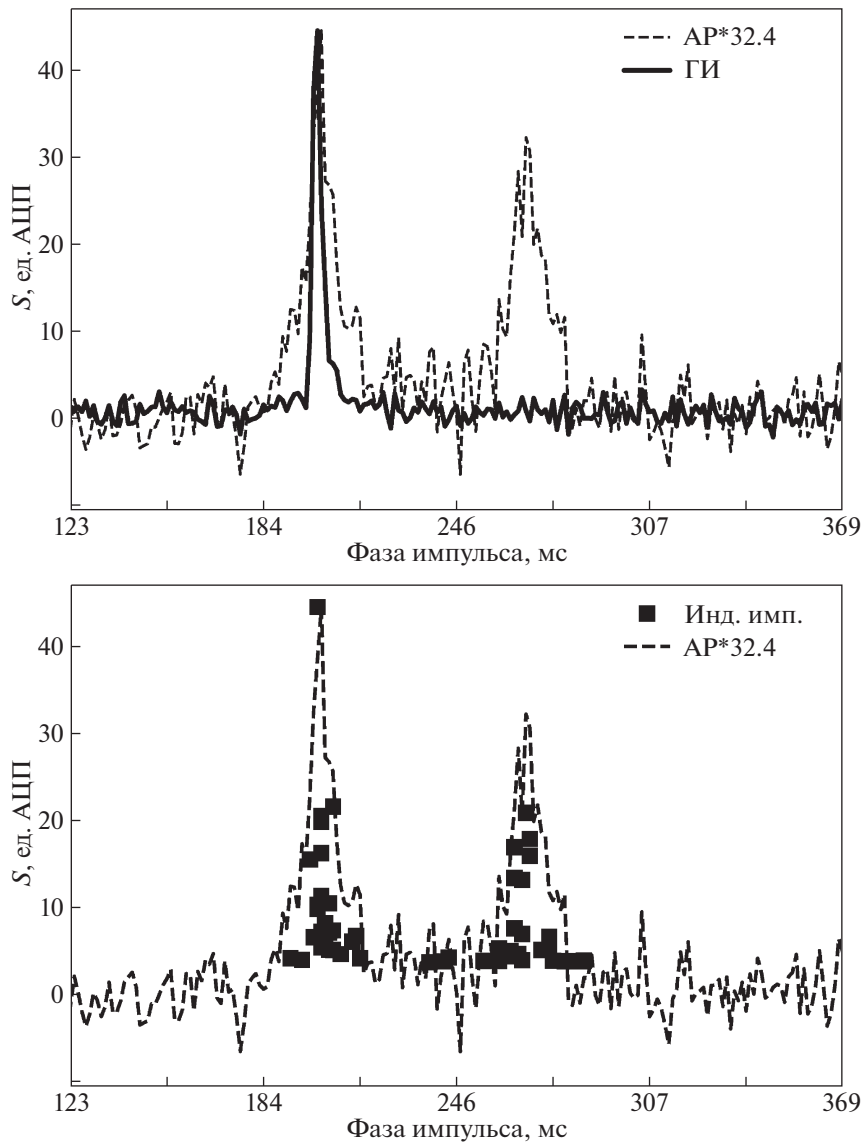


Рис. 2. Вверху — пример мощного ГИ, наблюдавшегося в первом компоненте пульсара 16.03.2018. Штриховой линией показан средний профиль, увеличенный в 32.4 раза; внизу — распределение мощных импульсов по фазе и пиковой плотности потока в сеансе (темные квадраты).

одиночного ГИ приведены на рис. 1. Примеры ГИ в первом и втором компонентах импульса приведены на рис. 2 и 3.

По основным энергетическим характеристикам 3160 импульсов были построены четыре распределения в логарифмическом масштабе: по абсолютной и относительной (в единицах S_{ap}) пиковой плотности потока, по абсолютной и относительной (в единицах энергии в динамическом среднем профиле) энергии в импульсе. Графики распределений приведены на рис. 4, 5. Как видно, все распределения имеют достаточно сложный вид, не сводимый однозначно ни к логнормальному (типичному для “регулярных” импульсов), ни к степенному (типичному для ГИ) виду на всем диапазоне значений.

В распределениях можно выделить логнормальную часть, степенную часть и длинный “хвост” распределения в высокоэнергетической части. Рассчитанные нами показатели степени для всех распределений в степенной части лежат в диапазоне значений от $\alpha \approx -3$ до $\alpha \approx -4$, при расчете показателя степени не учитывались одиночные события в хвосте распределения. Отметим, что учет хвоста распределения, очевидно, существенно изменяет показатель степени в сторону уменьшения его абсолютного значения, таким образом эта величина демонстрирует сильную модельную зависимость. Кроме того, пульсар демонстрирует заметную зависимость вида статистических распределений от общего времени наблюдений (см. [15, 30]), что мо-

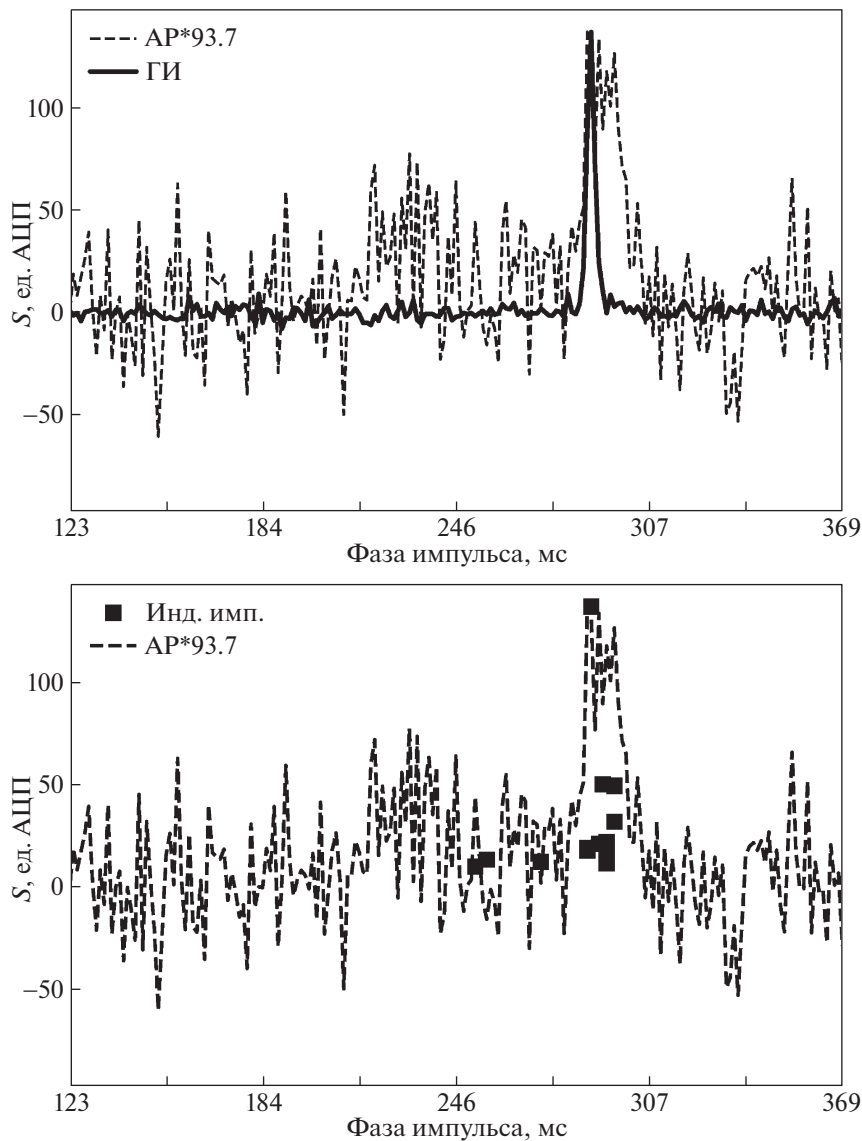


Рис. 3. Вверху — самый мощный ГИ, наблюдавшийся во втором компоненте пульсара 17.04.2014; внизу — распределение мощных импульсов по фазе и пиковой плотности потока в сеансе (темные квадраты).

жет быть обусловлено как влиянием межзвездной среды, так и изменениями собственной активности пульсара.

Пульсар В0301+19 имеет средний профиль с двумя ярко выраженными компонентами, мощные импульсы были зарегистрированы нами на долготах обоих компонентов в отношении $\approx 1/2$ (т.е. $\approx 34\%$ ГИ были зарегистрированы в первом компоненте, $\approx 66\%$ — во втором). При этом импульсы, регистрируемые во втором компоненте пульсара, обладают, как правило, большими значениями превышений над динамическим средним профилем по амплитуде и большими значениями пиковых плотностей потока. В пределах ошибки измерения нами не было обнаружено отличий в ширине мощных индивидуальных импульсов на широте 1-го и

2-го компонентов. Эффект межзвездного рассеяния приводит к заметному, хоть и незначительному (в пределах единицы дискрета АЦП) изменению формы заднего фронта импульса. Распределение мощных индивидуальных и ГИ по абсолютной пиковой плотности потока по времени и по фазе импульса показано на рис. 6. Как видно из рисунка, ГИ не имеют выделенной локализации в пределах среднего профиля, находясь при этом на долготах его главных компонентов. Гистограмма распределения импульсов по ширине на 50% интенсивности приведена на рис. 7.

Основные статистические характеристики наблюдавшихся ГИ сведены в табл. 2.

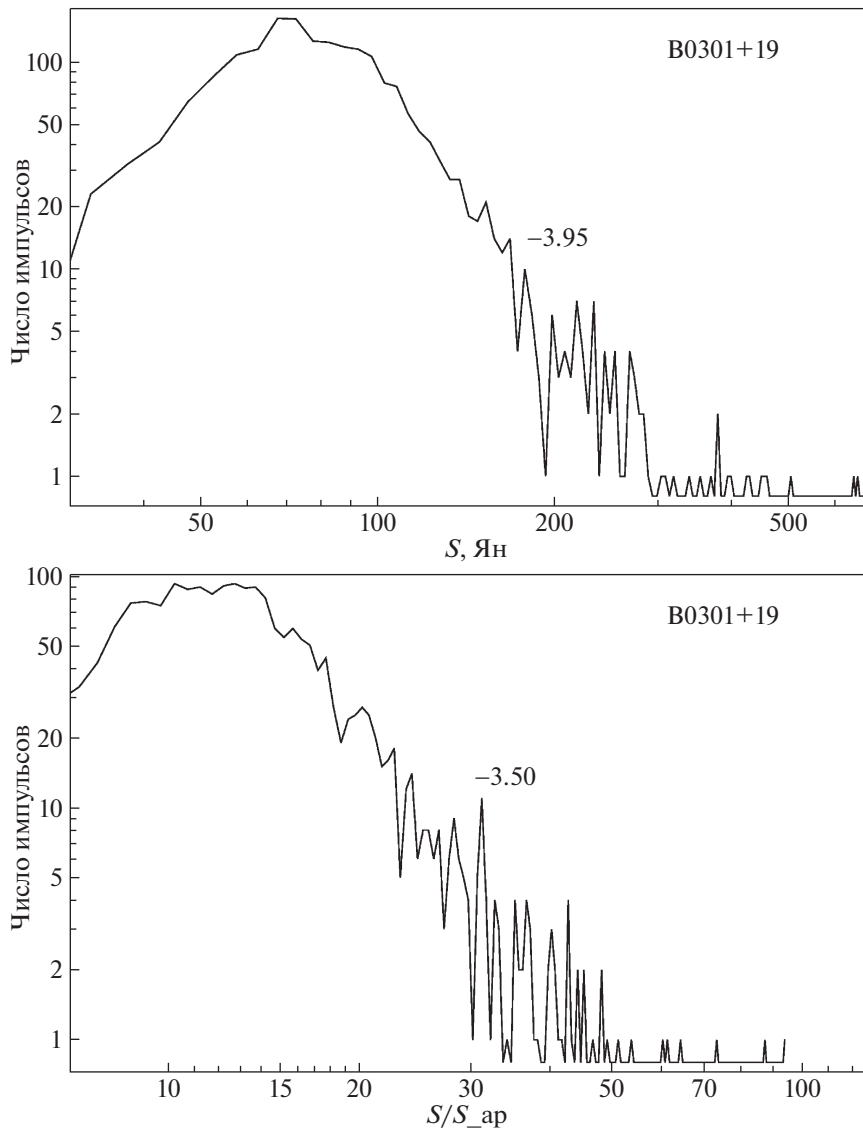


Рис. 4. Распределение импульсов пульсара B0301+19 с пиковой плотностью потока $S > 4\sigma_{ш}$: сверху — в абсолютных величинах (Ян), показатель степени степенного распределения (приведен рядом с графиком) рассчитан в диапазоне 100–300 Ян; внизу — в единицах пиковой плотности потока среднего за сеанс импульса, показатель степени рассчитан в диапазоне 15–50 S_{ap} .

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В период 2012–2017 гг. мы наблюдали регулярную генерацию мощных индивидуальных импульсов у пульсара B0301+19 (J0304+1932), которые с большой уверенностью были интерпретированы нами как ГИ. Если такие признаки ГИ, как значительное превышение индивидуальных импульсов над средним в сеансе по пиковой плотности потока (более 30 раз) и мощности (более 10 раз) были нами надежно подтверждены, то распределения импульсов по пиковой плотности потока и энергии не могут быть надежно интерпретированы как степенные, что считается важным критерием классификации ГИ. По совокупности характеристик B0301+19 может быть отнесен к подгруппе

генерирующих ГИ секундных пульсаров с малым значением магнитного поля на световом цилиндре [16].

Сложность интерпретации наблюдений ГИ пульсаров на низких радиочастотах связана с тем, что на них ярко выражены эффекты дифракционных и рефракционных мерцаний, которые могут привести к существенным вариациям абсолютных значений наблюдаемой плотности потока пульсара (до 10 раз) и искажению распределений импульсов по потокам. Если отойти от чисто феноменологического подхода (любой достаточно мощный импульс — “гигантский” по определению), то разделение эффектов, связанных с вариациями собственного излучения пульсара и влиянием среды,

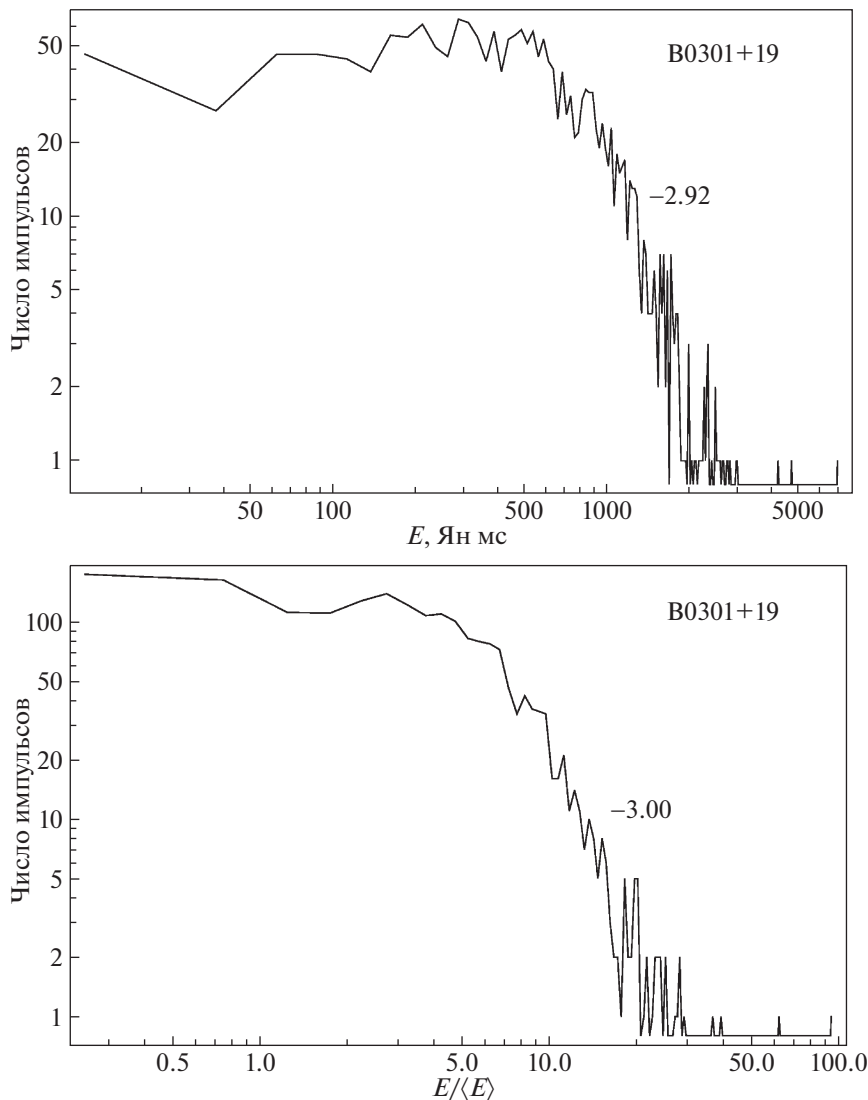


Рис. 5. Распределение импульсов пульсара B0301+19 с пиковой плотностью потока $S > 4\sigma_{\text{ш}}$ по энергии в импульсе E : вверху — в абсолютных величинах (Ян · мс), показатель степени рассчитан в диапазоне 1000–3000 Ян · мс; внизу — в единицах энергии среднего за сеанс импульса $\langle E \rangle$, показатель степени рассчитан в диапазоне 10–40 $\langle E \rangle$.

представляет, в общем случае, неразрешимую задачу. Тем не менее в задаче идентификации отдельных ГИ их узость относительно среднего профиля и локализация на долготах компонентов позволяет уверенно выделить их среди регулярных импульсов, усиление которых могло бы быть обусловлено мерцаниями. Кроме того, оценка характерного времени дифракционных и рефракционных мерцаний для пульсара с мерой дисперсии $15.657 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ на частоте 111 МГц составляет 1.16 мин и 1224 суток [31] соответственно (альтернативная оценка дает время дифракционных мерцаний 3.8 мин и радиус частотной декорреляции 240 Гц [26]), что на порядки превышает характерную длительность наблюдаемых ГИ и позволяет с уверенностью утверждать, что наблюдаемые нами

импульсы связаны с процессами, происходящими в магнитосфере пульсаров. Влияние мерцаний на вид статистических распределений, очевидно, в меньшей степени выражено для оценок плотности потока и энергии в относительных (в единицах среднего динамического профиля) величинах, чем в абсолютных (янские), но также окончательно не устранимо для обоих видов мерцаний, характерное время которых сравнимо с продолжительностью сеанса наблюдений (дифракционные мерцания) или с продолжительностью общего времени наблюдений (рефракционные). Отметим, что влияние мерцаний в частной области не влияет на результат после суммирования в полосе частот в силу того, что общая полоса частот много больше радиуса частотной декорреляции.

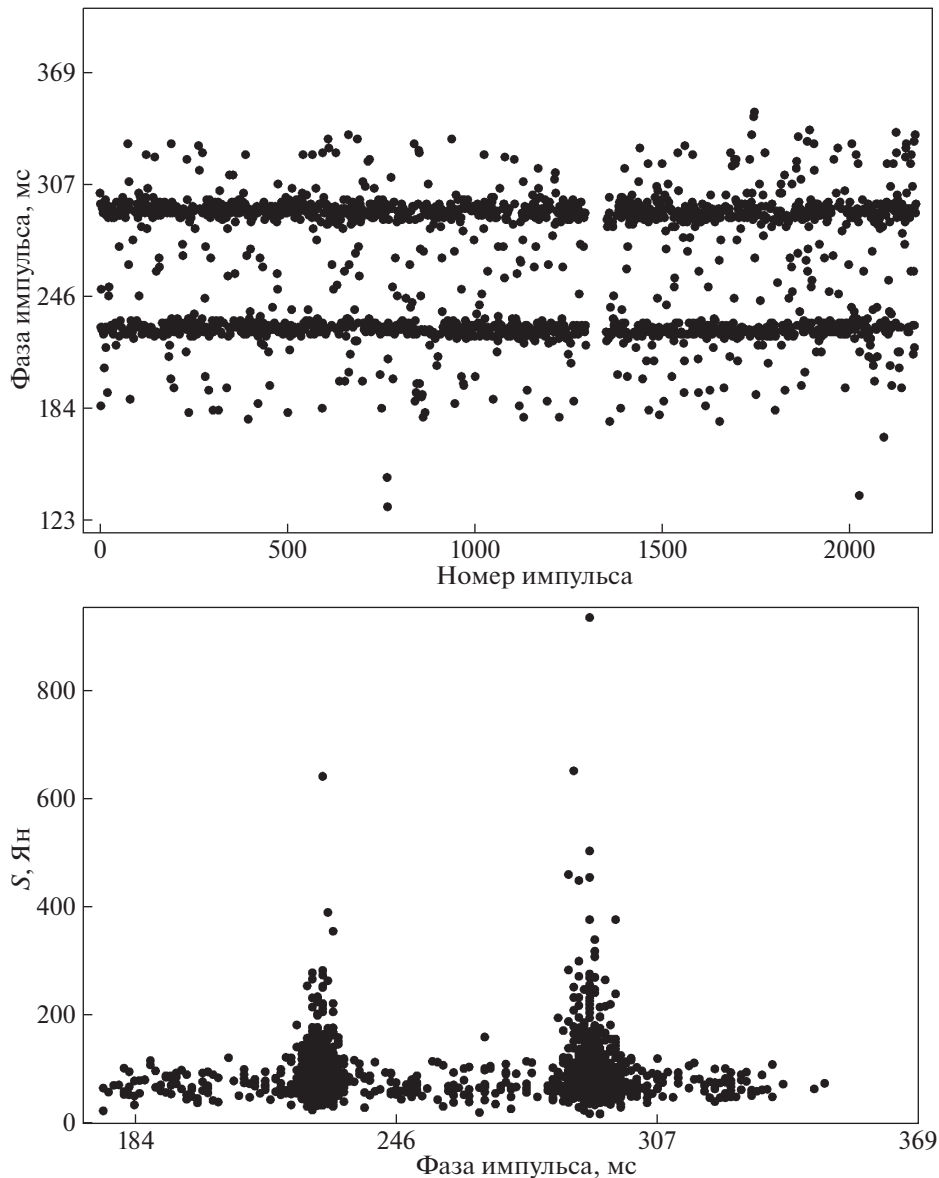


Рис. 6. Распределение импульсов пульсара V0301+19 с пиковой плотностью потока $S > 4\sigma_{ш}$ по фазе импульса: вверху — по оси абсцисс дан номер импульса в общей последовательности наблюдений, по оси ординат — фаза импульса в пределах периода; внизу — по оси абсцисс приведена фаза импульса, по оси ординат — плотность потока в Ян.

Сложный вид распределений мощных индивидуальных импульсов на 111 МГц, не сводимый к простой комбинации логнормального и линейного распределений, отмечался нами ранее в [30], причем как для пульсаров с ГИ, так и для обычных секундных пульсаров. Характерные “хвосты” в правой части распределения пиковой плотности потока и энергии ГИ наблюдались ранее у секундных пульсаров V1112+50 и V003-07 на частотах 100–160 МГц [32]. Отметим также, что качественно схожий вид распределения с выраженной степенной частью и “хвостом” в правой (высокоэнергетической) части был получен при симуляции распределения пиковых плотностей потока инди-

видуальных импульсов в рамках модели генерации ГИ при рассеивании фотонов на ультрарелятивистской электрон-позитронной плазме [33]. Картина распределений по плотностям потока и энергиям мощных индивидуальных импульсов для секундных пульсаров свидетельствует, что мы имеем дело скорее с параллельно протекающими в магнитосфере таких пульсаров процессами, ответственными за генерацию регулярных импульсов и ГИ, чем с триггерным механизмом, включающим и выключающим различные физические механизмы генерации по достижении некой пороговой мощности излучения. Вид таких распределений варьируется от практически чистого степенного для 0950+08

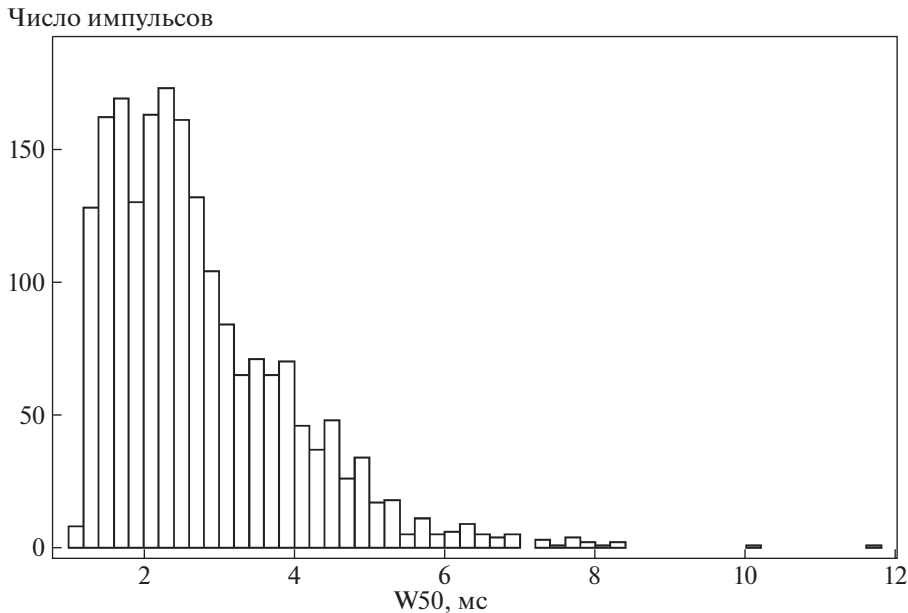


Рис. 7. Гистограмма распределения индивидуальных импульсов пульсара В0301+19 с пиковой плотностью потока $S > 4\sigma_{ш}$ по ширине на 50% интенсивности.

Таблица 2. Основные параметры ГИ пульсара В0301+19, определенные в наблюдениях 2012–2017 гг.

Параметр	Значение
N_{pulse}	3160
$S > 30S_{ap}$, %	2.53
$S > 40S_{ap}$, %	0.98
$S > 60S_{ap}$, %	0.25
$W50_{min}$, мс	1.12
$W50_{max}$, мс	11.69
$W50_{av}$, мс	2.75
$W50_{Smax}$, мс	2.8
α_S	-3.95 ± 0.32
α_{Sap}	-3.50 ± 0.16
α_E	-2.92 ± 0.13
α_{Eap}	-3.00 ± 24
S_{max} , Ян	935 ± 170
$S_{max \alpha}$, S_{ap}	93.7
E_{max} , Ян мс	6930 ± 1250
$E_{max \alpha}$, $\langle E \rangle$	94.1

Примечание. В таблице приведены: N_{pulse} — число наблюдавшихся индивидуальных импульсов с плотностью потока $S > 4\sigma_{ш}$, S_{ap} — плотность потока среднего за сеанс импульса, $\langle E \rangle$ — энергия среднего за сеанс импульса, $W50_{min}$, $W50_{max}$ и $W50_{av}$ — минимальная, максимальная и средняя ширина мощных индивидуальных импульсов на 50% интенсивности соответственно, $W50_{Smax}$ — ширина самого мощного импульса на 50% интенсивности, α_S , α_{Sap} , α_E , α_{Eap} — показатели степени для распределений ГИ по плотности потока, относительной плотности потока в единицах плотности потока среднего за сеанс импульса, энергии, относительной энергии в единицах энергии среднего за сеанс импульса соответственно, S_{max} , $S_{max \alpha}$, E_{max} , $E_{max \alpha}$ — максимальные наблюдавшиеся у ГИ значения плотности потока, относительной плотности потока, энергии и относительной энергии в импульсе соответственно.

до мало отличающегося от логнормального для В1112+50 (см. [30]).

Поскольку ГИ были впервые обнаружены у пульсаров с сильными магнитными полями на световом цилиндре (для пульсаров В0531+21 и В1937+21 значение $B_{LC} \propto 10^6$ Гс), дальнейшие случаи проявления этого феномена ожидалось прежде всего у пульсаров со сходными параметрами. Последующие наблюдения продемонстрировали несостоятельность данного предположения. Пульсары с ГИ, такие как В0031–07, J0529–6652, В0656+14, В0950+08, В1112+50, В1237+25 и В1752+23 обладают значениями магнитных полей на световом цилиндре на три–пять порядков меньшими, чем “классические” генераторы ГИ.

Приняв крайние значения B_{LC} и периодов подгруппы генерирующих ГИ секундных пульсаров с малыми значениями B_{LC} (см. [16, табл. 1]) в качестве краевых для ограничения выборки, мы можем грубо оценить общее число объектов, которые можно рассматривать в качестве кандидатов для реализации дальнейшей поисковой программы. В каталоге ATNF CSIRO [27] выбранным критериям соответствуют 158 объектов, 74 из которых находятся в северной полусфере, и около 2/3 могут наблюдаться на радиотелескопе БСА. В число таких пульсаров входит, в частности, пульсар В0643+80, демонстрирующий сильные вариации плотности потока и мощные индивидуальные импульсы, тем не менее, не классифицированные авторами исследования как ГИ [34], и пульсар В1133+16, генерирующий “пограничные” по своим свойствам (между регулярными и ГИ) мощные

индивидуальные импульсы и характеризующийся отличающимися распределениями пиковой плотности потока мощных импульсов для каждой из двух своих компонентов [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. E. Howard, D. H. Staelin, and E. C. Reifenstein, IAU Astron. Telegram Circ. 2110 (1968).
2. J. M. Sutton, D. H. Staelin, and R. M. Price, *The Crab Nebula*, Proc. of IAU Symp. 46, held at Jodrell Bank, England, August 5–7 1970, edited by R. D. Davies and F. Graham-Smith (Dordrecht, Reidel, 1971). IAU Symp. **46**, 97 (1971).
3. A. Kinkhabwala and S. E. Thorsett, *Astrophys. J.* **535**, 365 (2000).
4. V. A. Soglasnov, M. V. Popov, N. Bartel, W. Cannon, A. Yu. Novikov, V. I. Kondratiev, and V. I. Altunin, *Astrophys. J.* **616**(1), 439 (2004).
5. А. Д. Кузьмин, А. А. Ершов, Б. Я. Лосовский, Письма в Астрон. журн. **30**(4), 285 (2004).
6. B. C. Joshi, M. Kramer, A. G. Line, M. A. McLaughlin, and I. H. Stairs, *Astron. Soc. Pacific* **218**, 319 (2004).
7. F. Crawford, D. Altemose, H. Li, and D. R. Lorimer, *Astrophys. J.* **762**, 97 (2013).
8. S. Johnston and R. W. Romani, *Astrophys. J.* **590**(2), L95 (2003).
9. А. Д. Кузьмин, А. А. Ершов, Письма в Астрон. журн. **32**(9), 650 (2006).
10. A. K. Singal, *Astrophys. Space Sci.* **278**, 61 (2001).
11. Т. В. Смирнова, Астрон. журн. **89**(6), 480 (2012).
12. А. А. Ершов, А. Д. Кузьмин, Письма в Астрон. журн. **29**(2), 111 (2003).
13. A. N. Kazantsev and V. A. Potapov, *Astronomicheskii Tsirkulyar* 1620 (2015).
14. A. N. Kazantsev and V. A. Potapov, *Astronomicheskii Tsirkulyar* 1628 (2015).
15. A. N. Kazantsev and V. A. Potapov, *Astronomicheskii Tsirkulyar* 1638 (2017).
16. А. Н. Казанцев, В. А. Потапов, Астрон. журн. **94**(9), 749 (2017).
17. A. A. Ershov and A. D. Kuzmin, *Chin. J. Astron. and Astrophys.* **6**(2), 30 (2006).
18. R. W. Romani and S. Johnston, *Astrophys. J.* **557**, 93 (2001).
19. H. S. Knight, M. Bailes, R. N. Manchester, and S. M. Ord, *Astrophys. J.* **625**, 951 (2005).
20. A. Wolszczan, J. Cordes, D. Stinebring, *Birth and Evolution of Neutron Stars: Issues Raised by Millisecond Pulsars*, Proc. of the NRAO Workshop, held at the National Radio Astronomy Observatory (NRAO) Green Bank, West Virginia, June 6–8, 1984, edited by S. P. Reynolds and D. R. Stinebring (Green Bank: National Radio Astronomy Observatory, 1984), p. 63.
21. T. H. Hankins, J. S. Kern, J. C. Weatherall, and J. A. Eilek, *Nature* **422**, 141 (2003).
22. K. H. Hesse and R. Wielebinski, *Astron. and Astrophys.* **31**, 409 (1974).
23. R. T. Ritchings, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **176**, 249 (1976).
24. <https://github.com/gsafronov/pulsarFinder>
25. Ю. П. Илясов, С. М. Кутузов, В. А. Удадьцов, XI Всесоюзная радиоастрономическая конференция по аппаратуре, антеннам и методам, 26–31 октября 1978 г., Ереван, АрмССР. Тезисы докладов (Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1978) с. 154.
26. В. М. Малофеев, Труды ФИАН “Пульсары” **199**, 125 (1989).
27. ATNF CSIRO Pulsar Catalogue, <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>
28. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astrophys. J.* **129**, 1993 (2005).
29. J. M. Yao, R. N. Manchester, and N. Wang, *Astrophys. J.* **835**(1), id. 29 (2017).
30. A. N. Kazantsev and V. A. Potapov, *Res. Astron. and Astrophys.* **18**, (in press) (2018).
31. В. И. Шишов, В. М. Малофеев, А. В. Пынзарь, Т. В. Смирнова, Астрон. журн. **72**(4), 485 (1995).
32. R. Karuppusamy, B. W. Stappers, and M. Serylak, *Astron. and Astrophys.* **525**, id. A55 (2011).
33. S. A. Petrova, *Astron. and Astrophys.* **424**, 227 (2004).
34. V. M. Malofeev, D. A. Teplykh, O. I. Malov, and S. V. Logvinenko, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 538 (2016).