

УДК 539.125.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНА К ПРОЦЕССУ « $\gamma + \text{jet}$ » НА УСТАНОВКЕ CMS ПРИ НИЗКОЙ СВЕТИМОСТИ

*В. Ф. Конопляников<sup>a,1</sup>, А. Р. Уркинбаев<sup>a</sup>, О. Л. Кодолова<sup>b</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>b</sup> НИИЯФ МГУ, Москва

Исследуется эффективность различных критериев изолированности фотона и струи при подавлении фона к процессу « $\gamma + \text{jet}$ » на установке CMS. Делается оценка уровня фона при низкой светимости ( $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и исследуется влияние на него различных аппаратурных эффектов.

The effectiveness of various criteria of the photon and jet isolability at suppressing the background at the process « $\gamma + \text{jet}$ » on the CMS setup is investigated. The estimation of the background level at low luminosity ( $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) is done. The influence of different detector effects on the background level is investigated.

### ВВЕДЕНИЕ

Многие физические процессы, которые предполагается исследовать на установке CMS большого адронного коллайдера ЛНС, содержат от одной до нескольких струй в конечном состоянии. Поэтому от точности восстановления энергии струи будет во многом зависеть результативность проводимого на установке эксперимента. Это касается, в частности, открытия хиггс-бозона или суперсимметрии.

На точность восстановления энергии струи влияют как физические эффекты, так и характеристики детектора. Без введения поправок энергия восстановленной в калориметре струи оказывается меньше номинальной энергии партона, причем дефицит энергии зависит от энергии партона и может достигать десятков процентов. Поправки на энергию струи могут быть введены, в частности, с помощью процессов, в которых наряду со струей рождается объект, хорошо измеряемый в установке и связанный со струей однозначными кинематическими соотношениями. Примером таких процессов являются одноструйные процессы с прямыми фотонами (« $\gamma + \text{jet}$ »). Основной проблемой в данном случае является фон двухструйных событий с высокоэнергичной нейтральной частицей.

В работах [1–3] обоснована принципиальная возможность подавления фона к событиям « $\gamma + \text{jet}$ » при энергиях ЛНС: посредством моделирования процессов взаимодействия элементарных частиц программой PYTHIA 5.7 [4] было показано, что при поперечных энергиях фотонов, превышающих 40 ГэВ, используя критерии изоляции фотона и струи, можно добиться значительного преобладания сигнала над фоном.

Нами исследована возможность подавления фона при полном моделировании процессов в установке CMS при низкой светимости ( $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Моделирование

---

<sup>1</sup> По направлению из ГГУ, Гомель, Белоруссия.

процессов взаимодействия элементарных частиц осуществлялось с использованием программы PYTHIA 6.156 [5], прохождение частиц через установку, работа детекторов и реконструкция сигналов моделировались с помощью программных пакетов CMSIM 121 [6] и ORCA 4.5.4 [7]. Для моделирования некоторых простейших аппаратурных эффектов использовалась программа CMSJET 4.703 [8].

Настоящая работа не ограничивается оценкой уровня фона: такая оценка может оказаться модельно-зависимой, например, из-за проблем генерации событий в недоступной для действующих экспериментов области энергий. Целью работы было также выяснить, насколько влияют на возможность подавления фона отдельные физические и аппаратурные эффекты. Для этого исследования проводились на различных уровнях моделирования процессов в установке:

- PARTICLE — моделирование процессов с помощью PYTHIA 6.156;
- FIELD — PARTICLE + моделирование магнитного поля (4 Тл) с помощью CMSJET 4.703;
- SMEAR — FIELD + моделирование пространственного и энергетического разрешения с помощью CMSJET 4.703;
- NO PILEUP — полное моделирование процессов в установке без наложения сигналов от различных событий с помощью программ PYTHIA 6.156, CMSIM 121 и ORCA 4.5.4;
- LOW LUMI — NO PILEUP + моделирование наложения сигналов от различных событий, характерного для низкой светимости.

## 1. УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ОТБОР СОБЫТИЙ

Фоновыми к одноструйным событиям с прямыми фотонами могут быть произвольные двухструйные события, в которых либо фотоны, излученные кварками (« $\gamma$  – brem»), либо фотоны, рожденные при распадах мезонов (« $\gamma$  – mes»), неотличимы в установке от прямых фотонов (« $\gamma$  – dir»), рожденных в «комптоновском»  $qg \rightarrow q + \gamma$  или «аннигиляционном»  $q\bar{q} \rightarrow g + \gamma$  процессах. В дальнейшем для всех таких «фотонов» (« $\gamma$  – dir», « $\gamma$  – brem» и « $\gamma$  – mes») будет использоваться обозначение « $\gamma$ ».

При моделировании событий с использованием программного пакета PYTHIA 6.156 вместе с процессами с прямыми фотонами (ISUB = 14, 29) генерировались все  $2 \rightarrow 2$ -процессы КХД и стандартной модели с достаточно большими сечениями: ISUB = 1–2, 11–16, 18–20, 28–31, 53, 68.

Фон исследовался в трех интервалах по поперечному импульсу «фотона»:

$$P_T^\gamma < P_{T \min}^\gamma = 20, 40 \text{ и } 100 \text{ ГэВ}/c.$$

Генерация выполнялась при ограничениях на поперечные импульсы жесткого процесса:

$$\text{SKIN}(3) \equiv \hat{p}_\perp^{\min} = \frac{1}{2} P_{T \min}^\gamma.$$

Задаваемый интервал между значением SKIN(3) и поперечными импульсами «фотонов» ( $P_T^\gamma$ ) в отбираемых событиях преследовал две цели:

а) учесть «фотоны», рождаемые при малых  $P_T$  жесткого процесса:  $\hat{p}_\perp < P_T^\gamma$ ;

б) иметь в отобранных событиях правильный спектр дисбаланса  $P_T^\gamma - P_T^{\text{jet}}$ , который существенно сужается, когда моделирование идет, например, при условии  $\hat{p}_\perp = P_T^\gamma$ .

При предварительном отборе событий на уровне частиц в качестве претендентов на фоновые отбирались события, удовлетворяющие следующим условиям:

- в  $\eta$ - $\phi$ -пространстве ( $\eta$  — псевдобыстрота,  $\phi$  — азимутальный угол) существует область размером  $4 \times 4$  кристалла электромагнитного калориметра, в которой есть хотя бы один электрон, фотон или  $K_S^0$ -мезон (последний полагался стабильным при моделировании события, и его распад анализировался при моделировании его прохождения через установку с помощью программы CMSIM) с поперечным импульсом больше чем 5 ГэВ/с;

- сумма модулей поперечных импульсов стабильных частиц за вычетом нейтрино в указанной области « $4 \times 4$ » ( $P_T^{4 \times 4}$ ) достигает значения  $P_{T \min}^\gamma$ ;

- в области « $4 \times 4$ » нет адронов с поперечным импульсом больше 10 ГэВ/с;

- сумма поперечных импульсов стабильных частиц за вычетом нейтрино в конусе радиусом 0,7, описанном в  $\eta$ - $\phi$ -пространстве вокруг области « $4 \times 4$ », не превышает 25 %  $P_T^{4 \times 4}$ ;

- та же сумма без учета заряженных частиц, поперечные импульсы которых  $P_T < 2$  ГэВ/с, не превышает 20 %  $P_T^{4 \times 4}$ .

При указанных условиях было сгенерировано примерно по 400 миллионов и отобрано по 50 000 событий в каждом интервале по  $P_T$ . Отобранные события моделировались затем в условиях установки.

## 2. КРИТЕРИЙ ИЗОЛИРОВАННОСТИ ФОТОНА

Рис. 1 иллюстрирует возможность разделения сигнальных (« $\gamma + \text{jet}$ ») и фоновых событий по изолированности «фотона» на четырех уровнях моделирования процессов в установке без наложения сигналов от различных событий: PARTICLE, FIELD, SMEAR и NO PILEUP. В качестве меры изолированности принята величина  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  — скалярная сумма поперечных энергий, выделенных в ячейках калориметров, принадлежащих конусу радиусом  $R = 0,7$ , очерченному в  $\eta$ - $\phi$ -пространстве вокруг «фотона», за исключением центральной области размером  $7 \times 7$  кристаллов электромагнитного калориметра. На рисунке представлены спектры  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  в случаях сигнальных и фоновых событий. Видно, что эти спектры различны и при одинаковых ограничениях на величину изолированности фотона они на разных уровнях моделирования с разной эффективностью подавляют не только фон, но и сигнал. Чтобы сравнить возможности подавления фона на разных уровнях моделирования, в работе делалась оценка отношений чисел сигнальных ( $S$ ) и фоновых ( $B$ ) событий не в зависимости от значений ограничений на некоторые параметры, а в зависимости от степени подавления сигнала:  $\text{Eff}_S = S_{\text{после отбор}} / S_{\text{без отбор}}$ . В табл. 1 представлены отношения  $S/B$ , соответствующие значениям  $\text{Eff}_S = 90, 50$  и 10 %.

Из рис. 1 и табл. 1 видно, что магнитное поле и пространственное и энергетическое разрешение в установке практически не затрудняет идентификацию сигнала и фона по критерию изолированности фотона. В то же время на уровне NO PILEUP сигнал и фон разделяются существенно хуже.

Значения  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  на уровне NO PILEUP возрастают из-за того, что на этом уровне моделирования к значениям энергий, реконструируемых в ячейках калориметров, вносится добавка, имитирующая шумы электроники. Величина этой добавки описывается в программном пакете ORCA 4.5.4 нормальным законом распределения с математиче-

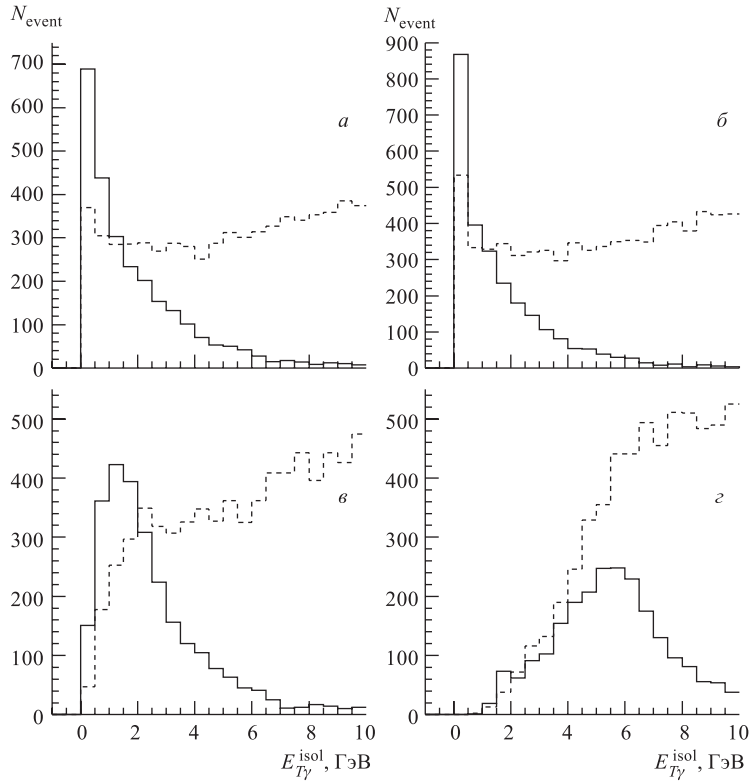


Рис. 1. Спектры  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  в событиях с прямыми фотонами (непрерывная линия) и фоновых событиях (штриховая) на различных уровнях моделирования процессов в установке: PARTICLE (а), FIELD (б), SMEAR (в) и NO PILEUP (г). Случай  $R = 0,7$ ;  $E_{\text{min}}^{\text{cell}} = 2\sigma$ ,  $40 < E_T^\gamma < 100$  ГэВ

Таблица 1. Верхние ограничения на величину изолированности фотона  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  в случае конуса радиуса  $R = 0,7$  и отношения чисел сигнальных и фоновых событий ( $S/B$ ), соответствующие значениям  $\text{Eff}_S = 90, 50$  и  $10\%$ , на различных уровнях моделирования процессов в установке: PARTICLE, FIELD, SMEAR и NO PILEUP при  $40 < E_T^\gamma < 100$  ГэВ

Уровни	PARTICLE			FIELD			SMEAR			NO PILEUP		
	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %
$E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , ГэВ	7,1	1,8	0,5	5,9	1,4	0,3	7,8	2,5	0,7	12,0	5,6	2,2
$S/B$	0,9	1,6	2,0	0,9	1,5	1,8	0,9	1,7	2,1	0,6	1,0	1,3

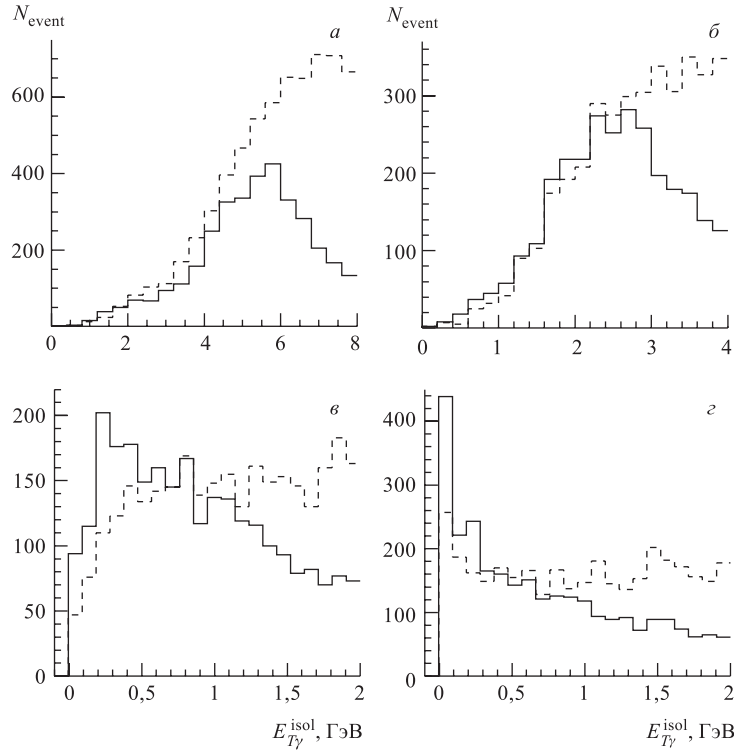


Рис. 2. Спектры  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  в событиях с прямыми фотонами (непрерывная линия) и фоновых событиях (штриховая) на уровне NO PILEUP при различных значениях порога  $E_{\text{min}}^{\text{cell}} = 2\sigma$  (а),  $2,4\sigma$  (б),  $3\sigma$  (в) и  $3,5\sigma$  (г). Случай  $R = 0,7$ ;  $40 < E_T^\gamma < 100$  ГэВ

Таблица 2. Верхние ограничения на величину изолированности фотона  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  и отношения чисел сигнальных и фоновых событий ( $S/B$ ), соответствующие значениям  $\text{Eff}_S = 90, 50$  и  $10\%$ , в случаях конусов радиуса  $R = 0,3; 0,5$  и  $1$  и значений порогов  $E_{\text{min}}^{\text{cell}} = 2\sigma$  и  $3\sigma$  при  $40 < E_T^\gamma < 100$  ГэВ

а) Уровень NO PILEUP										
$E_{\text{min}}^{\text{cell}}$	Конус	$R = 0,3$			$R = 0,5$			$R = 1,0$		
		$\text{Eff}_S$	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %
$2\sigma$	$E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , ГэВ	4,4	1,6	0,9	6,5	3,4	1,8	17	11,5	5,5
	$S/B$	0,47	0,80	1,0	0,55	0,94	1,23	0,47	0,7	1,3
$3\sigma$	$E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , ГэВ	3,0	0,44	0,03	3,9	0,8	0,2	7,8	2,4	1,0
	$S/B$	0,42	0,72	0,9	0,50	0,96	1,25	0,47	1,2	2,0
б) Уровень LOW LUMI										
$E_{\text{min}}^{\text{cell}}$	Конус	$R = 0,3$			$R = 0,5$			$R = 1,0$		
		$\text{Eff}_S$	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %
$2\sigma$	$E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , ГэВ	5,1	2,4	1,2	8,2	6,3	3,5	35	24	16
	$S/B$	0,44	0,68	0,78	0,43	0,67	1,0	0,30	0,46	0,68
$3\sigma$	$E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , ГэВ	3,4	1,0	0,04	7,3	3,1	0,9	23	13	7
	$S/B$	0,44	0,73	0,84	0,43	0,75	1,2	0,32	0,57	0,88

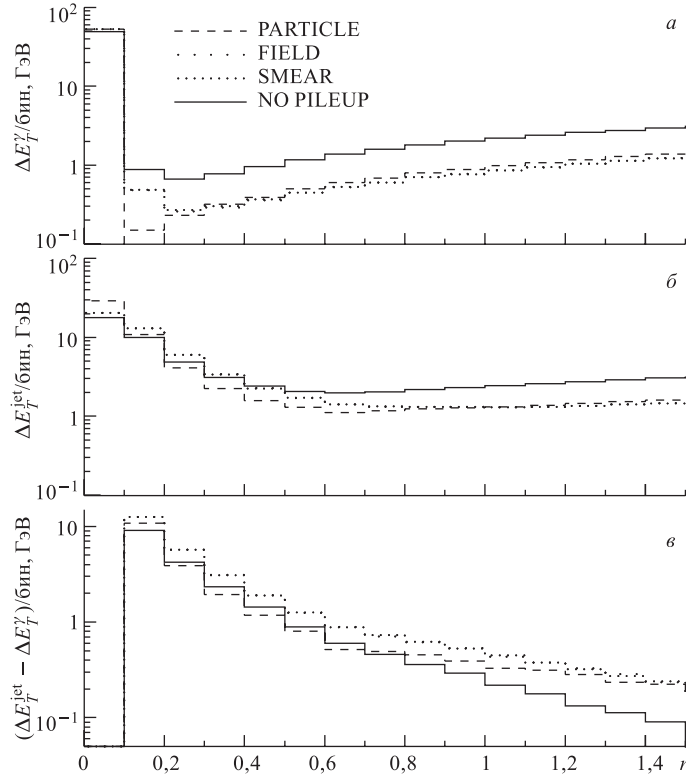


Рис. 3. Средние значения поперечных энергий в бинах по расстоянию в  $\eta$ - $\phi$ -пространстве до прямого фотона (а) и гравитационного центра струи (б) и разности этих средних значений (в). Результат получен по 10000 событиям с прямыми фотонами из интервала  $40 < P_T^\gamma < 100$  ГэВ для уровней PARTICLE, FIELD, SMEAR и NO PILEUP

ским ожиданием ( $\mu$ ) и средними квадратичными отклонениями ( $\sigma$ ), равными:  $\mu = 0$ ;  $\sigma = 30$  МэВ в цилиндрической части электромагнитного калориметра,  $\sigma = 150$  МэВ в торцевых частях электромагнитного калориметра,  $\sigma = 150$  МэВ в адронном калориметре.

При реконструкции сигнала от ячеек калориметров (кристаллов и башен) учитывались лишь ячейки, значение энерговыделения в которых превышало значение  $E_{\min}^{\text{cell}} = 2\sigma$ . Как видно из рис. 2, можно добиться лучшего разделения сигнала и фона повышением порога  $E_{\min}^{\text{cell}}$  на энерговыделение в ячейках калориметров с  $2\sigma$  до  $3\sigma$ .

Другая возможность подавления фона состоит в отборе событий с наложением ограничений на значения  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , вычисленные для конусов различных радиусов  $R$ . Как показывает рис. 3, значения поперечной энергии в окрестности прямых фотонов и струй отличаются и это отличие сохраняется на далекой периферии:  $r \approx 1,5$ . Поэтому для отделения прямых фотонов от фотонов струйного происхождения есть смысл пользоваться значениями  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , вычисленными для конусов с радиусами вплоть до  $R \approx 1,5$ .

В табл. 2 показано, как наложение ограничений на значения  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  меняет в отобранных событиях соотношения чисел сигнальных и фоновых событий в зависимости от

значений  $\text{Eff}_S$ . Наилучшее подавление фона при отсутствии дополнительных наложенных событий наблюдается при  $E_{\min}^{\text{cell}} \approx 3\sigma$  и значениях  $R \approx 1$  (см. табл. 2, а).

### 3. ПОДАВЛЕНИЕ ФОНА ПРИ НИЗКОЙ СВЕТИМОСТИ

Кроме шумов электроники на возможность подавления фона в установке существенно влияет также наложение сигналов от разных событий, которые записались в процессе сбора по сигналу триггера или в промежуток времени до срабатывания триггера. Это видно из сравнения случаев а и б в табл. 2: если, например, при ограничении на  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , соответствующем  $\text{Eff}_S = 10\%$ , отношение  $S/B$  на уровне NO PILEUP достигает 2 (при  $E_{\min}^{\text{cell}} = 3\sigma$  и  $R = 1$ ), то на уровне LOW LUMI — всего лишь 1,2 (при  $E_{\min}^{\text{cell}} = 3\sigma$  и  $R = 1$ ). Эффективность ограничения на  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  более всего снижается при больших  $R$ . Оптимальным становятся конусы изолированности с радиусами  $R \approx 0,5$  при пороге на энергию, выделенную в ячейке калориметра,  $E_{\min}^{\text{cell}} \approx 3\sigma$ .

Кроме ограничения на  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$  исследовалась также возможность подавления фона путем наложения ограничений на другие величины, характеризующие, в основном, изолированность «фотона» и струи:

$E_{T\text{jet}}^{\text{isol}}$  — скалярная сумма поперечных энергий ( $E_T$ ) в ячейках калориметров, принадлежащих кольцу  $0,7 < R < 1$ , центр которого совпадает с гравитационным центром струи;

$E_T^{\text{miss}}$  — дефицит поперечной энергии, измеренной в установке, — модуль векторной суммы  $E_T$  всех ячеек калориметров;

$\Delta\phi$  — интервал по азимутальному углу  $\phi$  между векторами  $E_T$  струи и «фотона» (при этом струя собиралась в калориметрах в конусе  $R = 0,7$ , а «фотон» — в  $3 \times 3$ -кристаллах электромагнитного калориметра);

$E_T^{\text{jet}2}$  — наибольшая поперечная энергия дополнительных струй;

$E_T^{\text{out}1}$  — модуль векторной суммы  $E_T$  ячеек калориметров за исключением  $7 \times 7$ -кристаллов электромагнитного калориметра вокруг кандидата в «фотоны» и области радиусом 0,8 вокруг струи;

$E_{T_s}^{\text{out}1}$  — скалярная сумма  $E_T$  тех же ячеек;

$E_T^{\text{out}2}$  — модуль векторной суммы  $E_T$  ячеек калориметров за исключением конуса радиусом  $R = 0,8$  вокруг «фотона» и конуса такого же размера вокруг струи;

$E_{T_s}^{\text{out}2}$  — скалярная сумма  $E_T$  тех же ячеек.

Исследования проводились как на уровне частиц (PARTICLE), так и при детальном моделировании установки: без наложения событий (уровень NO PILEUP) и с наложением событий, соответствующим низкой светимости (уровень LOW LUMI).

Результаты исследований представлены в табл. 3. Относительные случайные погрешности отношений  $S/B$  не превышают 2, 3 и 5 % для значений  $\text{Eff}_S = 90, 50$  и 10 % соответственно. Видно, что эффект наложения дополнительных событий существенно ухудшает возможность подавления фона. При этом наиболее эффективные отборы, использующие жесткие ограничения с  $\text{Eff}_S \approx 10\%$  на  $E_T^{\text{jet}2}$ ,  $E_T^{\text{out}1}$ ,  $E_T^{\text{out}2}$ ,  $E_{T_s}^{\text{out}1}$  и  $E_{T_s}^{\text{out}2}$ , приводят к отношениям  $S/B$  в 1,5–3 раза меньшим, чем на уровнях PARTICLE и NO PILEUP. Ограничение на изолированность струи дает на уровне LOW LUMI незначительный эффект, хотя он существен на уровне PARTICLE, а также на уровне NO PILEUP при  $\text{Eff}_S \approx 50\%$ . Ограничение на дефицит поперечной энергии незначительно влияет на

Таблица 3. Верхние ограничения на  $E_{T\text{jet}}^{\text{isol}}$  и другие параметры событий, приводящие к подавлению сигнала с  $\text{Eff}_S = 90, 50$  и  $10\%$  (а) и соответствующие этим ограничениям отношения чисел сигнальных и фоновых событий (б), на различных уровнях моделирования процессов в установке: PARTICLE, NO PILEUP и LOW LUMI при  $40 < E_T^\gamma < 100$  ГэВ

а) Верхние ограничения на различные параметры событий									
Уровни	PARTICLE			NO PILEUP			LOW LUMI		
$\text{Eff}_S$	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %
$E_{T\text{jet}}^{\text{isol}}$ , ГэВ	7,9	2,7	0,7	9,9	6,2	3,1	19,0	12,7	7,4
$E_T^{\text{miss}}$ , ГэВ	9,2	4,0	1,5	24,7	13,2	5,3	31,2	16,5	6,1
$180^\circ - \Delta\phi^\circ$	25,6	6,5	1,0	24,9	7,1	1,2	27,3	7,9	1,4
$E_T^{\text{jet}2}$ , ГэВ	26,1	11,7	6,0	22,0	10,7	5,6	30,7	19,7	13,5
$E_T^{\text{out}1}$ , ГэВ	28,3	11,0	3,3	23,4	10,3	3,6	34,9	18,0	6,8
$E_T^{\text{out}2}$ , ГэВ	29,7	11,4	3,6	24,1	9,8	3,5	32,0	14,9	5,7
$E_{T_s}^{\text{out}1}$ , ГэВ	133	86	53	174	141	116	501	359	248
$E_{T_s}^{\text{out}2}$ , ГэВ	129	83	51	165	133	109	482	343	235
б) $S/B$									
Уровни	PARTICLE			NO PILEUP			LOW LUMI		
$\text{Eff}_S$	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %
$E_{T\text{jet}}^{\text{isol}}$ , ГэВ	0,23	0,28	0,36	0,25	0,28	0,25	0,23	0,24	0,22
$E_T^{\text{miss}}$ , ГэВ	0,22	0,23	0,21	0,23	0,24	0,21	0,21	0,22	0,24
$180^\circ - \Delta\phi^\circ$	0,24	0,30	0,33	0,25	0,29	0,29	0,24	0,27	0,26
$E_T^{\text{jet}2}$ , ГэВ	0,27	0,38	0,52	0,27	0,36	0,44	0,25	0,32	0,34
$E_T^{\text{out}1}$ , ГэВ	0,27	0,39	0,61	0,28	0,44	0,59	0,25	0,31	0,40
$E_T^{\text{out}2}$ , ГэВ	0,27	0,35	0,38	0,27	0,33	0,36	0,25	0,29	0,28
$E_{T_s}^{\text{out}1}$ , ГэВ	0,27	0,44	0,87	0,30	0,49	0,99	0,22	0,25	0,31
$E_{T_s}^{\text{out}2}$ , ГэВ	0,25	0,35	0,50	0,27	0,35	0,53	0,22	0,24	0,28

соотношение сигнала и фона. В случае параметра  $\Delta\phi$  эффективны лишь мягкие ограничения с  $\text{Eff}_S \approx 50\%$ .

Возможность подавления фона оценивалась по наибольшему значению отношения  $S/B$ , которого можно добиться путем отбора событий с использованием ограничений на различные параметры при фиксированных значениях  $\text{Eff}_S$ . В работе определяются три верхние границы отношения  $S/B$ :

- а) независимая от условий в установке (исследования на уровне PARTICLE),
- б) независимая от наложения событий (уровень NO PILEUP),
- в) при наложении событий (уровень LOW LUMI).

Верхние границы отношения  $S/B$  оценивались путем варьирования значений ограничений на различные параметры и выбора такого набора этих значений, при котором отношение  $S/B$  достигало максимума при фиксированных значениях  $\text{Eff}_S$ . При этом набор параметров также варьировался и из наборов, обеспечивавших наибольшие значения  $S/B$ , выбирался меньший по числу параметров.

Исследования показали, что наибольшего подавления фона на уровнях PARTICLE и NO PILEUP можно добиться при одновременном наложении ограничений на  $E_T^{\text{jet}2}$ ,  $\Delta\phi$ ,  $E_T^{\text{out}1}$ ,  $E_{T_s}^{\text{out}1}$  и на три величины  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , вычисляемые при  $R = 0, 7; 1$  и  $1, 5$  и ограничении



Таблица 4. Верхние ограничения на различные параметры, приводящие при их одновременном использовании к подавлению сигнала с  $\text{Eff}_S = 90, 50$  и  $10\%$  и соответствующие им отношения чисел сигнальных и фоновых событий ( $S/B$ ) и отношения чисел событий с фотонами, излученными кварками (« $\gamma - \text{brem}$ »), к числам событий с фотонами, рожденными при распаде мезонов (« $\gamma - \text{mes}$ »), на различных уровнях моделирования процессов в установке: PARTICLE, NO PILEUP и LOW LUMI

а) Случай $20 < E_T^\gamma < 30$ ГэВ									
Уровни	PARTICLE			NO PILEUP			LOW LUMI		
$\text{Eff}_S$	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %
$E_T^{\text{jet}2}$ , ГэВ	23	14	10	19	13	10	21	16	12
$180^\circ - \Delta\phi^\circ$	81	35	16	175	54	19	150	74	20
$E_T^{\text{out}1}$ , ГэВ	27	14	8	25	16	10	42	29	18
$E_{T_s}^{\text{out}1}$ , ГэВ	140	108	86	178	156	139	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=0,5$ , ГэВ	—	—	—	—	—	—	4,7	2,7	0,9
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=0,7$ , ГэВ	5,8	3,0	0,9	4,5	1,8	0,7	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=1,0$ , ГэВ	10,5	5,9	2,1	6,2	3,1	1,0	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=1,5$ , ГэВ	21,1	13,0	5,9	13,3	7,9	3,8	—	—	—
$S/B$	0,3	0,9	2,5	0,2	0,5	1,1	0,2	0,3	0,5
$N^{\gamma-\text{brem}}/N^{\gamma-\text{mes}}$	0,3	0,4	0,7	0,3	0,4	0,6	0,2	0,3	0,3
б) Случай $40 < E_T^\gamma < 55$ ГэВ									
Уровни	PARTICLE			NO PILEUP			LOW LUMI		
$\text{Eff}_S$	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %
$E_T^{\text{jet}2}$ , ГэВ	32	20	12	27	17	11	31	22	17
$180^\circ - \Delta\phi^\circ$	43	24	12	46	25	14	47	24	13
$E_T^{\text{out}1}$ , ГэВ	34	20	9	29	17	10	49	32	24
$E_{T_s}^{\text{out}1}$ , ГэВ	152	120	91	190	163	143	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=0,5$ , ГэВ	—	—	—	—	—	—	8,2	3,9	1,4
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=0,7$ , ГэВ	6,2	3,0	0,9	6,0	2,2	0,7	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=1,0$ , ГэВ	12,3	6,0	2,2	10,0	4,6	1,4	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=1,5$ , ГэВ	33,2	19,7	8,0	18,8	12,0	4,9	—	—	—
$S/B$	0,5	2,2	13,4	0,4	1,4	3,2	0,3	0,8	1,8
$N^{\gamma-\text{brem}}/N^{\gamma-\text{mes}}$	0,4	0,8	1,1	0,3	0,7	0,8	0,2	0,4	0,7
в) Случай $100 < E_T^\gamma < 130$ ГэВ									
Уровни	PARTICLE			NO PILEUP			LOW LUMI		
$\text{Eff}_S$	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %	90 %	50 %	10 %
$E_T^{\text{jet}2}$ , ГэВ	69	45	24	62	35	17	57	33	20
$180^\circ - \Delta\phi^\circ$	42	21	10	44	23	13	43	22	14
$E_T^{\text{out}1}$ , ГэВ	72	42	18	59	33	15	64	35	21
$E_{T_s}^{\text{out}1}$ , ГэВ	219	160	124	234	190	159	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=0,5$ , ГэВ	—	—	—	—	—	—	9,5	3,9	1,4
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=0,7$ , ГэВ	8,2	2,9	0,4	10,4	3,4	0,8	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=1,0$ , ГэВ	17,5	7,6	3,2	14,2	5,4	1,8	—	—	—
$E_{T_\gamma}^{\text{isol}}$ , $R=1,5$ , ГэВ	42,3	23,1	14,0	36,1	16,2	9,6	—	—	—
$S/B$	1,2	5,2	17,0	0,7	3,4	9,3	0,6	2,1	5,2
$N^{\gamma-\text{brem}}/N^{\gamma-\text{mes}}$	0,7	2,4	3,0	0,4	1,2	1,7	0,4	1,0	1,6

на  $E_{\min}^{\text{cell}} = 3\sigma$ . На уровне LOW LUMI достаточно использовать ограничения на  $E_T^{\text{jet}2}$ ,  $\Delta\phi$ ,  $E_T^{\text{out}1}$  и величину  $E_{T\gamma}^{\text{isol}}$ , вычисляемую при  $R = 0,5$ .

Значения ограничений на различные параметры и соответствующие им отношения  $S/B$  в различных интервалах по  $E_T^\gamma$  представлены в табл. 4. Относительные случайные погрешности отношений  $S/B$  не превышают 5, 7 и 15 % для значений  $\text{Eff}_S = 90, 50$  и 10 % соответственно.

Видно, что аппаратные эффекты при работе реальной установки существенно ухудшают возможность подавления фона по сравнению с той, что имелась на уровне частиц. Отношение  $S/B$  на уровне NO PILEUP уменьшается по сравнению с уровнем PARTICLE в 2–4 раза, а на уровне LOW LUMI в 3–7 раз в разных интервалах по поперечным энергиям фотонов при ограничениях на параметры событий с  $\text{Eff}_S = 10\%$ . Таким образом, можно заключить, что шумы электроники и наложение сигналов от разных событий влияют на изолированность фотона и струи и примерно в равной степени ухудшают возможность выделения сигнальных событий.

Существенного преобладания сигнала над фоном ( $S/B > 5$ ) можно добиться в условиях низкой светимости лишь при больших поперечных энергиях фотонов:  $E_T^\gamma > 100$  ГэВ и жестких ограничениях на параметры событий, соответствующих  $\text{Eff}_S \approx 10\%$ .

Влияние наложения событий может быть ослаблено при использовании информации из трековых детекторов. Однако, как показывает сравнение колонок NO PILEUP и LOW LUMI в табл. 4, даже при полном исключении дополнительных наложенных событий доля фона в отобранных событиях может быть уменьшена не более чем в два раза.

Приведенные в этой же таблице отношения чисел событий с фотонами, излученными кварками (« $\gamma - \text{brem}$ »), к числам событий с фотонами, рожденными при распаде мезонов (« $\gamma - \text{mes}$ »), показывают, что увеличение доли фона на уровне LOW LUMI связано, прежде всего, с увеличением доли « $\gamma - \text{mes}$ » в отобранных событиях. Из сравнения колонок PARTICLE, NO PILEUP и LOW LUMI в табл. 4 для случаев а, б, и в видно, что если при малых поперечных энергиях фотонов на это увеличение в большей степени влияют эффекты уровня LOW LUMI, то при больших — эффекты уровня NO PILEUP.

В сделанных оценках уровня фона не учтена возможность его уменьшения за счет более точной идентификации фотонов, рожденных при распадах  $\pi^0$  и других мезонов. (Такая идентификация может быть выполнена, в частности, с использованием данных координатных детекторов.) Однако приведенные значения  $N^{\gamma-\text{brem}}/N^{\gamma-\text{mes}}$  позволяют сделать оценки отношения  $S/B$  в зависимости от эффективности подавления « $\gamma - \text{mes}$ », осуществляемого с использованием разных методов идентификации распадающихся на фотоны мезонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность подавления фона к событиям с прямыми фотонами в установке CMS при низкой светимости путем отбора событий с использованием ограничений на изолированность фотона и струи. Исследования выполнены при полном моделировании процессов в установке с помощью программ PYTHIA 6.156, CMSIM 121 и ORCA 4.5.4. Показано, что аппаратные эффекты при работе реальной установки существенно снижают эффективность критериев изолированности при подавлении фона: при поперечных энергиях фотонов  $E_T^\gamma = 20-130$  ГэВ эти критерии позволяют за счет

10-кратного подавления сигнала достичь на уровне частиц отношения сигнала к фону, равного 2,5–17; при моделировании же установки эти числа уменьшаются до 0,5–5,2. Основными причинами этого являются шумы электроники и наложение сигналов от разных событий.

Полученные результаты показывают возможность калибровки струй с помощью событий с прямыми фотонами в области  $E_T^\gamma > 100$  ГэВ. При поперечных энергиях фотонов  $E_T^\gamma \approx 40$  ГэВ фон может вносить большие систематические погрешности в калибровку, однако отобранные события могут быть использованы для калибровки струй в начальный период работы установки, когда еще не будет достаточной статистики по другим калибровочным выборкам.

В дальнейшем предполагается дать оценку погрешностей, которые будет вносить фон в калибровку струй.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bandourin D. V., Konoplyanikov V. F., Skachkov N. B.* Jet energy scale setting with « $\gamma + \text{Jet}$ » events at LHC energies. Detailed study of the background suppression. JINR Preprint E2-2000-255. Dubna, 2000. 23 p.; hep-ex/0011013.
2. *Bandourin D. V., Konoplyanikov V. F., Skachkov N. B.* « $\gamma + \text{Jet}$ » events rate estimation for gluon distribution determination at LHC // Part. Nucl., Lett. 2000. V. 103. P. 34–43.
3. *Bandurin D., Konoplyanikov V., Skachkov N.* On the application of « $\gamma + \text{jet}$ » events for setting of absolute jet energy scale and determining the gluon distribution at the LHC. hep-ex/0207028. 2002. V. 2. 107 p.
4. *Sjostrand T.* High-energy physics event generation with PYTHIA 5.7 and JETSET 7.4 // Comp. Phys. Commun. 1994. V. 82. P. 74–90.
5. *Sjostrand T.* High-energy physics event generation with PYTHIA 6.1 // Comp. Phys. Commun. 2001. V. 135. P. 238–259.
6. *Charlot C. et al.* CMSIM-CMANA. CMS Simulation Facilities. CMS Note CMS TN/93-63. 54 p.
7. *Innocente V., Stickland D.* The design, implementation and deployment of a functional prototype OO reconstruction software for CMS. The ORCA project // Intern. Conf. on Computing in High-Energy Physics and Nuclear Physics (CHEP 2000), Padova, Italy, Feb. 7–11, 2000. P. 56–64.
8. *Abdullin S., Khanov A., Stepanov N.* CMSJET. CMS Note CMS TN/94-180. 13 p.

Получено 9 марта 2004 г.