

ISSN 1561-2430 (Print)
 ISSN 2524-2415 (Online)
 УДК 621.373.826
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-459-469>

Поступила в редакцию 10.08.2020
 Received 10.08.2020

Р. В. Чулков, О. П. Корожан, В. А. Орлович

Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

СТАТИСТИКА ФЛУКТУАЦИЙ ЭНЕРГИЙ ИМПУЛЬСОВ ГЕНЕРАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА НА ВЫНУЖДЕННОМ КОМБИНАЦИОННОМ РАССЕЯНИИ

Аннотация. Приводятся результаты исследования статистики флуктуаций энергий импульсов генерации ВКР-лазера с оптической накачкой многомодовыми импульсами наносекундной длительности. Методами численного моделирования системы связанных дифференциальных уравнений для медленно меняющихся амплитуд поля накачки и первых трех стоксовых компонент, выполненных с учетом пространственной неоднородности пучка накачки, спонтанных шумов и оптической обратной связи, обнаружено резкое увеличение амплитуды флуктуаций в нелинейном режиме ВКР-преобразования при согласовании оптической длины резонатора ВКР-лазера с длиной резонатора многомодового лазера накачки. Так, при средней эффективности преобразования в излучение 1-й стоксовой компоненты 3,5–3,8 % расчеты показали возрастание коэффициента вариации (КВ) случайной величины с 9 до 118 %. В линейном режиме ВКР-преобразования, когда эффективность преобразования составляет 0,2–0,03 %, предсказано дальнейшее увеличение значения КВ до 270–500 %. Численно показано, что статистика флуктуаций в условиях согласования длин резонаторов является существенно негауссовой и описывается распределениями плотности вероятности (РПВ) L-вида с максимумами, расположенными вблизи нуля и длинными хвостами. Результаты расчетов количественно подтверждены экспериментом для ВКР-лазера на кристалле нитрата бария в припороговых условиях его работы, когда эффективность преобразования в излучение 1-й стоксовой компоненты не превышала 0,3 %. Резонатор такого лазера был сформирован двумя плоскими зеркалами, обеспечивающими конфигурацию двухпроходной накачки. При возбуждении ВКР-лазера линейно-поляризованными импульсами 2-й гармоники Nd:АИГ-лазера длительностью 7–8 нс реализован режим работы первого, характеризующий гиперэкспоненциальными РПВ с КВ, достигающими 480 %, что в 2–2,5 раза превышает их значения для условий однопроходного ВКР.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), ВКР-лазер, статистика флуктуаций, коэффициент вариации, распределение плотности вероятности

Для цитирования. Чулков, Р. В. Статистика флуктуаций энергий импульсов генерации твердотельного лазера на вынужденном комбинационном рассеянии / Р. В. Чулков, О. П. Корожан, В. А. Орлович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 459–469. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-459-469>

Ruslan V. Chulkov, Olga P. Korozhan, Valentin A. Orlovich

B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

STATISTICS OF PULSE ENRGY FLUCTUATIONS IN A SOLID-STATE RAMAN LASER

Abstract. In this paper, we present the results of the study of the statistics of pulse energy fluctuations in a Raman laser under optical pump by the multimode nanosecond pulses. A system of coupled differential equations for slowly varying envelopes of the pump field and first three Stokes lines was integrated numerically with taking into account spatial inhomogeneity of the pump beam, spontaneous noise, and optical feedback. Data of the numerical simulation revealed a sharp increase in the fluctuation amplitude in the nonlinear regime of Raman frequency conversion when the optical length of the Raman cavity was matched with the cavity length of the multimode pump laser. At a mean 1st Stokes conversion efficiency of 3.5–3.8 %, the calculations showed an increase in the coefficient of variation (CV) of a random value from 9 % to 118 %. In the linear regime of Raman frequency conversion, when the conversion efficiency was 0.2–0.03 %, a further increase in the CV value up to 270–500 % was predicted. It is also numerically shown that the fluctuation statistics under the conditions of the cavity length matching is essentially non-Gaussian and described by the L-type probability density distributions (PDDs) with long tails and maxima located near zero. The numerical data were quantitatively confirmed by an experiment for a Raman laser on a barium nitrate crystal operated near the Raman threshold, when the 1st Stokes conversion efficiency did not exceed 0.3 %. A Raman cavity was formed by two flat mirrors providing a double-pass pump configuration. The Raman laser was excited by the linearly polarized frequency-doubled radiation of a Q-switched Nd:YAG laser generating multimode pulses with a duration of 7–8 ns. A Raman laser operating regime characterized by the hyperexponential PDDs with CVs reaching 480 %, which is 2–2.5 times higher than those observed earlier for the single-pass conditions of stimulated Raman scattering, was realized.

Keywords: stimulated Raman scattering (SRS), Raman laser, statistics of fluctuations, coefficient of variation, probability density distribution

For citation. Chulkov R. V., Korozhan O. P., Orlovich V. A. Statistics of pulse energy fluctuations in a solid-state Raman laser. *Vestsi Natsyianal'най akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 459–469 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-459-469>

Введение. Прогнозирование и предупреждение событий, в ходе которых амплитуды наблюдаемых величин могут многократно превосходить их средние значения, является важным направлением статистической физики. Такие события, включая аномально большие волны на поверхности океана [1], стихийные бедствия [2, 3], падение валютного и фондового рынков [4], аварии на транспорте и транспортный коллапс [5], блэкаут электросетей [6], отказы электроники [7] и т. д., как правило, подчиняются существенно негауссовой статистике, часто именуемой статистикой экстремальных значений (СЭЗ). СЭЗ характеризуется распределениями плотностей вероятности (РПВ) L-вида с сильно вытянутыми хвостами. В оптике подобные распределения, которые обычно связывают с формированием блуждающих волн и спорадических солитонов [8], описывают генерацию суперконтинуума в оптических волокнах [8], образование филаментов в газах [9], волокнах [10] и нелинейных оптических резонаторах [11], флуктуации интенсивности в параметрических усилителях [12] и волоконных лазерах с синхронизацией мод [13]. Было показано, что существенная роль в формировании РПВ L-вида в нелинейных системах принадлежит модуляционной неустойчивости в присутствии шумовых начальных условий [8, 10, 12].

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), развиваясь с уровня спонтанных шумов, является еще одним примером нелинейно-оптического явления, в котором крупномасштабные флуктуации спектра [14], длительности [15], интенсивности [16] и энергии импульсов [17–19, 25] возможны. Предыдущие исследования статистики флуктуаций энергий стоксовых импульсов однопроходного ВКР в газах [20–24], кристаллах [25] и оптических волокнах [26–28] выявили, что в условиях когерентного взаимодействия в линейном режиме ВКР-преобразования, когда истощением излучения накачки можно пренебречь, она описывается экспоненциальным РПВ с максимумом вблизи нуля [20–23] и относительным разбросом (коэффициентом вариации) случайной величины, который приближается к 100 % [20, 21]. В случае же спектрально-широкополосной накачки флуктуации становятся гиперэкспоненциальными, а разброс может достигать [24] и даже превышать [26] 200 %.

В настоящей работе мы приводим результаты исследований статистики флуктуаций энергий импульсов генерации твердотельного ВКР-лазера. Мы показываем, что в условиях, когда в качестве оптической накачки такого лазера используются наносекундные многомодовые импульсы, вид РПВ существенным образом зависит от согласования оптической длины его резонатора с длиной резонатора лазера накачки. В случае такого согласования ВКР-лазер генерирует импульсы с энергией, статистика флуктуаций значений которой отлична от гауссовой и от экспоненциальной. Как в линейном, так и в нелинейном режимах ВКР-преобразования она характеризуется РПВ L-вида с максимумом вблизи нуля и коэффициентом вариации, превышающим 100 %. При этом, возрастая при приближении к порогу ВКР, амплитуда флуктуаций достигает 500 %, демонстрируя тем самым сверххаотичный режим работы ВКР-лазера с гиперэкспоненциальной СЭЗ.

Описание эксперимента. В качестве накачки использовалось излучение 2-й гармоники многомодового Nd:АИГ-лазера с активной модуляцией добротности резонатора, оптическая длина которого L_p составляла 48 см. На длине волны $\lambda_0 = 532$ нм лазер генерировал линейно-поляризованные импульсы излучения длительностью $\tau_p \sim 7$ нс и спектральной шириной $\delta\tilde{\omega}_0 \sim 0,7$ см⁻¹. Энергия импульсов достигала 90 мДж, ее среднеквадратичное отклонение от номинального значения находилось в пределах 1,4–3,0 %. ВКР происходило в кристалле нитрата бария (НБ) длиной 70 мм. Нитрат бария является оптически изотропным кристаллом, в котором наиболее сильный комбинационный переход имеет частотный сдвиг 1047 см⁻¹ [29], что при возбуждении в нем ВКР излучением накачки с длиной волны 532 нм обеспечивало длины волн генерации 563; 599 и 639 нм для 1-й, 2-й и 3-й стоксовых компонент (СК) соответственно. Пучок накачки диаме-

тром 3–4 мм направлялся в кристалл, торцы которого были вырезаны под углом Брюстера для предотвращения оптической обратной связи. Сам кристалл был помещен в отдельный резонатор, сформированный двумя плоскими селективными диэлектрическими зеркалами, одно из которых имело достаточное пропускание на длине волны накачки. Коэффициенты отражения этих зеркал (табл. 1) обеспечивали реализацию двухпроходной геометрии накачки кристалла и эффективную обратную связь на длинах волн первых двух стоксовых компонент. Выходное зеркало устанавливалось на моторизованную подвижку, которая обеспечивала плавную подстройку длины резонатора ВКР-лазера. Спектральная селекция излучения стоксовых компонент, генерируемых ВКР-лазером, осуществлялась цветными стеклянными фильтрами.

Таблица 1. Коэффициенты отражения зеркал резонатора ВКР-лазера

Table 1. Reflection coefficients for the Raman cavity mirrors

Зеркало	Коэффициент отражения на длине волны, %			
	532 нм	563 нм	599 нм	639 нм
Входное	28	99	48	26
Выходное	>99	86	>99	36

Энергии импульсов генерации лазера накачки и ВКР-лазера измерялись синхронно двухканальным интерфейсом Ophir Pulsar-2 с пьезоэлектрическими детекторами PE9 и PE10. Для того чтобы корректно прописать весь диапазон значений энергий отдельных импульсов ВКР-лазера, вблизи порога его генерации использовался подход, при котором измерения отдельной последовательности энергий импульсов генерации производились в два или три этапа в течение равных промежутков времени на каждом этапе. При этом пределы измерений на втором и третьем этапах устанавливались таким образом, чтобы они были на порядок величины меньше пределов предыдущих этапов (рис. 1, *a*). Полученные предварительные результаты измерений далее программно обрабатывались, когда события текущего этапа, значения которых находились ниже предела измерений последующего этапа и выше предела измерения предыдущего этапа, отбрасывались (рис. 1, *b*). После этого производился статистический анализ отфильтрованных вышеуказанным способом событий. Описанный подход корректен, если последовательность импульсов, генерируемая ВКР-лазером, является стационарным случайным процессом. Это условие выполнялось с хорошим приближением по истечении 40–60 мин с момента начала генерации.

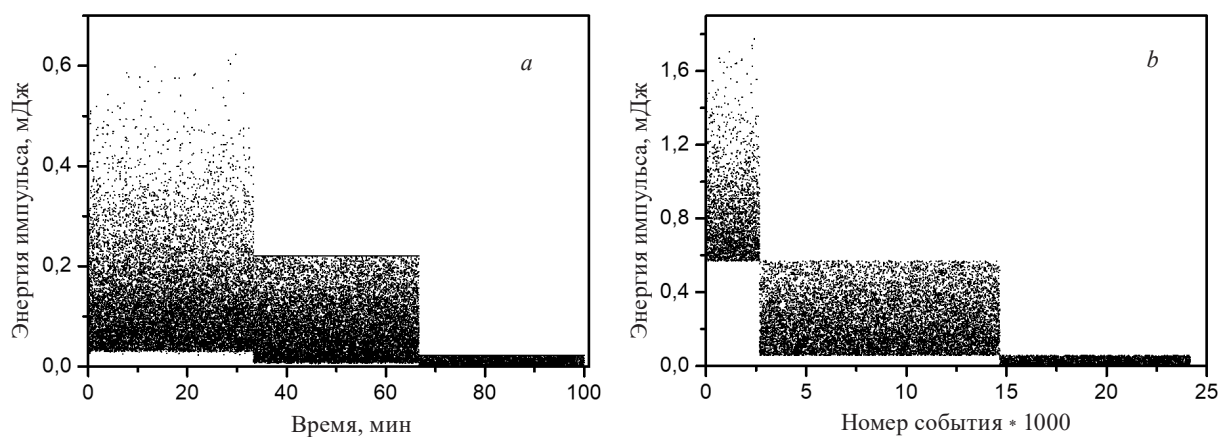


Рис. 1. Примеры временной разверстки результатов измерений энергий импульсов генерации 1 СК ВКР-лазера: *a* – экспериментально зарегистрированная измерителем энергии на трех разных пределах измерений 1 мДж, 200 и 20 мкДж; *b* – после программной обработки с учетом пропускания светофильтров

Fig. 1. Examples of time series of the energy measurement results for the 1st Stokes pulses generated by the Raman laser: *a* – experimentally recorded by the energy meter at three different measurement ranges 1 mJ, 200 μJ, and 20 μJ; *b* – after software processing with taking into account the filter transmission

С целью снижения влияния на результаты статистического анализа энергий импульсов генерации ВКР-лазера флуктуаций энергий импульсов лазера накачки статистическая обработка выполнялась только для тех событий, для которых значения энергий импульсов лазера накачки попадали в диапазон, в пределах которого их среднеквадратичное отклонение не превышало 1 %. События вне границ этого диапазона отбрасывались.

Численная модель. Программный код для расчета ВКР-генерации в поле многомодовых лазерных импульсов базировался на системе связанных дифференциальных уравнений для медленно меняющихся амплитуд [30]:

$$\left(\pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\eta_n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) A_n^\pm = -\frac{\alpha_n}{2} A_n^\pm + (Q_n^{\pm\pm})^* A_{n-1}^\pm + (Q_n^{\mp\pm})^* A_{n-1}^\mp - Q_{n+1}^{\pm\pm} A_{n+1}^\pm - Q_{n+1}^{\mp\pm} A_{n+1}^\mp, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{T_2} \right) Q_n^{\pm\pm} = \frac{g_n}{2T_2} A_{n-1}^\pm (A_n^\pm)^* + F_n^{\pm\pm}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{T_2} \right) Q_n^{\mp\pm} = \frac{g_n}{2T_2} A_{n-1}^\mp (A_n^\pm)^* + F_n^{\mp\pm}, \quad (3)$$

где z и t – соответственно продольная координата и время, A_n^\pm – комплексные амплитуды спектральных компонент поля с частотами ω_n и волновым числом k_n , знаки «+» и «-» при амплитудах соответствуют волнам, распространяющимся в попутном и обратном направлениях, соответственно, η_n и α_n – значения показателей преломления и коэффициентов поглощения активной среды на соответствующих частотах, Q_n – нормированные амплитуды фононных колебаний, g_n – стационарные коэффициенты ВКР-усиления для соответствующих компонент поля, T_2 – время поперечной релаксации доминирующего комбинационного перехода активной среды и F_n – операторы случайной силы [31]. Индекс n принимает значения от 0 до 3 при индексировании амплитуд полей, где «0» соответствует полю накачки, а «1»–«3» – стоксовым компонентам того же порядка, и от 1 до 3 при индексировании амплитуд фононных колебаний и операторов случайной силы.

Уравнения (1)–(3) описывают генерацию излучения стоксовых компонент по каскадному механизму без учета параметрического взаимодействия между отдельными компонентами в приближении плоских волн. Они интегрировались численно с использованием неявной консервативной конечно-разностной схемы интегрирования второго порядка точности по временной и пространственной координатам [32] для условий эксперимента. Параметры расчета, указанные в табл. 2, брались в соответствии с известными литературными данными. Граничные условия учитывали оптическую обратную связь на зеркалах резонатора ВКР-лазера. Импульс накачки на входе в ВКР-лазер моделировался в виде набора мод с амплитудами a_m и фазами φ_m , разделенных интервалом частот $\Omega = c / 2L_p$, c – скорость света в вакууме:

$$A_0^\pm = G \sum_m a_m \exp(im\Omega t + i\varphi_m), \quad (4)$$

где $m = 0, \pm 1, \dots, \pm m_{\max}$, а огибающая G предполагалась гауссовой по поперечной координате и времени:

$$G(r, t) = \exp \left[-\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - 2 \ln 2 \left(\frac{t - 2t_0}{\tau_p} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Значение модовой амплитуды a_m определялось ее положением в ансамбле мод с гауссовым спектральным профилем $a_m^2 = S_m$,

$$S_m = S_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\Omega}{\delta \tilde{\omega}_0 c} \right)^2 m^2 \right], \quad (6)$$

а фаза φ_m каждой моды бралась статистически независимой случайной величиной, удовлетворяющей равномерному распределению на интервале $[0, \varphi_{\max}]$. Значение φ_{\max} равно $1,75 \pi$, обеспечивало наилучшее соответствие между экспериментально измеренными и численно смоделированными импульсами накачки.

Таблица 2. Параметры расчета

Table 2. Parameters of the calculation

Параметр	Значение	Параметр	Значение
α_{0-3}	$0,07 \text{ м}^{-1}$	g_1	43 см/ГВт [33]
η_{0-3}	1,57 [27]	g_2	38 см/ГВт [33, 34]
T_2	25 пкс [27]	g_3	31 см/ГВт [33, 34]

Результаты. Результаты расчета усредненных за 100 лазерных выстрелов энергетической эффективности преобразования в импульсы попутного ВКР 1 СК, а также суммарной эффективности преобразования попутного и обратного ВКР в первые три СК представлены на рис. 2, а в зависимости от отношения оптической длины резонатора ВКР-лазера L_R к длине L_P . Представленные данные получены для нелинейного режима ВКР-преобразования, когда энергия импульсов накачки в 4–6 раз превышала порог генерации ВКР-лазера. Видно, что на фоне постепенного и монотонного падения эффективностей с ростом отношения L_R / L_P наблюдается их локальное возрастание, когда L_R равна L_P , либо $L_P / 2$. Такое возрастание объясняется увеличением коэффициента кросс-корреляции интенсивностей возбуждающего и преобразованного излучения [35]. Наряду с этим в вышеуказанных условиях резко увеличивается разброс энергий

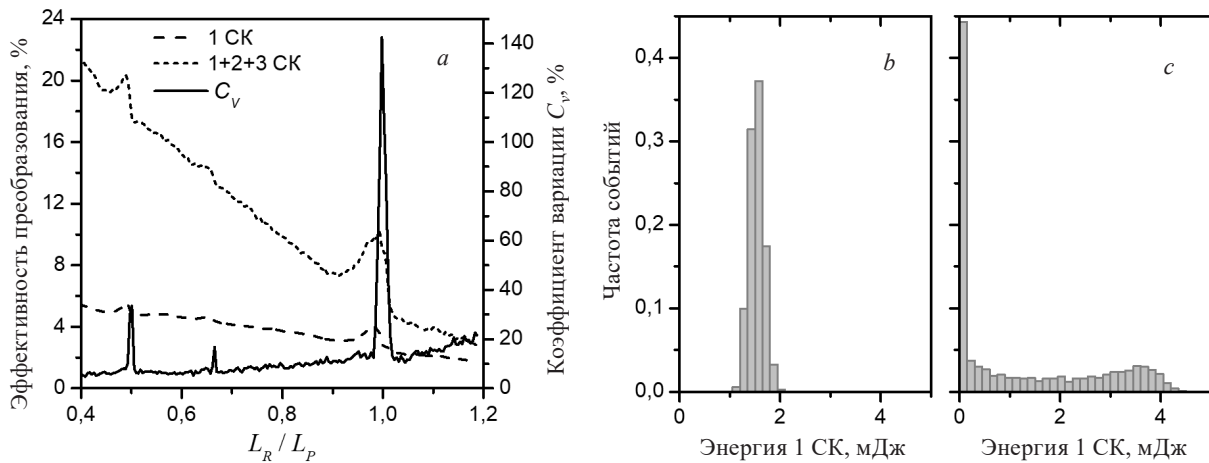


Рис. 2. Зависимости средней эффективности преобразования в импульсы попутного ВКР 1 СК, суммарной эффективности преобразования попутного и обратного ВКР (1 + 2 + 3 СК) и коэффициента вариации C_v для энергий импульсов 1 СК, численно рассчитанные при энергии накачки $E_p = 34$ мДж как функции отношения L_R к L_P (а); РПВ энергий импульсов 1 СК, рассчитанные при $E_p = 40$ мДж, $L_R / L_P = 0,89$ (b) и $E_p = 35$ мДж, $L_R / L_P = 1,0$ (c); средние значения эффективностей преобразования в излучение 1 СК для обоих РПВ (3,8 % (b) и 3,5 % (c)), приблизительно равны, в то время как значения C_v (9 % (b) и 118 % (c)) резко отличаются

Fig. 2. Dependences of the mean conversion efficiency to the forward 1st Stokes pulses (1 СК), sum conversion efficiency to the pulses of forward and backward SRS (1 + 2 + 3 СК), and coefficient of variation C_v for the 1st Stokes pulse energies, numerically calculated at the pump energy $E_p = 34$ mJ as a function of the L_R to L_P ratio (a); PDD of the 1st Stokes pulse energies calculated at $E_p = 40$ mJ, $L_R / L_P = 0,89$ (b) and $E_p = 35$ mJ, $L_R / L_P = 1,0$ (c); the mean 1st Stokes conversion efficiencies for both the PDDs, 3,8 % (b) and 3,5 % (c), are approximately equal while the C_v values, 9 % (b) and 118 % (c), are drastically different

импульсов стоксовой генерации. Так, например, значение коэффициента вариации $C_v = \Delta E / \bar{E}$ (где \bar{E} – среднее значение, а ΔE – среднеквадратичное отклонение) для энергий импульсов 1 СК возрастает более чем на порядок величины, достигая 140 %. В ВКР-преобразователях с однопроходной геометрией взаимодействия подобные высокие значения C_v ранее наблюдались лишь вблизи порога ВКР, когда эффективность преобразования в излучение стоксовой компоненты была существенно меньше 1 % [20, 21, 24, 26]. При этом значение C_v быстро снижалось с ростом эффективности преобразования. Было показано, что большая величина разброса импульсов ВКР-генерации обусловлена как вкладом квантовых шумов на этапе спонтанного комбинационного рассеяния [20, 21], так и шумами интенсивности излучения накачки [24, 26].

Расчеты, выполненные нами, показывают, что в нелинейном режиме ВКР-преобразования режим относительно стабильной генерации ВКР-лазера с многомодовой накачкой может быть реализован только в условиях отсутствия согласования длины его резонатора L_R с длиной L_P . В этом случае коэффициент вариации C_v для энергий импульсов 1 СК не должен превышать 15 %, а РПВ будет близкой к гауссовой с максимумом, расположенным вблизи среднего значения (рис. 2, *b*). В случае же точного согласования длин, форма РПВ должна резко меняться, становясь L-образной с сильно вытянутым хвостом, где наиболее вероятными будут оказываться события, значения которых близки нулю (рис. 2, *c*). Статистика флуктуаций, соответствующая РПВ подобного вида, ранее наблюдалась только вблизи порогов генерации однопроходных ВКР-преобразователей, когда истощением излучения накачки можно было пренебречь, а эффективность преобразования в стоксовое излучение не превышала долей процента [20–26]. С ростом эффективности преобразования характер флуктуаций менялся, а их статистика становилась близкой к нормальной, когда максимум РПВ располагался вблизи среднего значения [36].

Тенденцию увеличения разброса и перехода к близкой к гиперэкспоненциальной статистике флуктуаций энергий импульсов генерации ВКР-лазера в линейном режиме ВКР-преобразования демонстрирует рис. 3, на котором численно рассчитанные и экспериментально измеренные РПВ энергий импульсов 1 СК представлены для случая, когда длины резонаторов L_R и L_P равны друг другу. Как расчет, так и эксперимент показывают быстрый рост значений C_v с падением эффективности преобразования в стоксовое излучение. Так, например, при средней эффективности преобразования 0,2–0,3 % величина C_v существенно превышает 200 % (рис. 3, *c, d, g, h*), а при эффективности 0,03–0,04 % она возрастает почти до 500 % (рис. 3, *a, b, e, f*). Эта величина в 2–2,5 раза превышает ранее наблюдаемые значения C_v для условий однопроходного ВКР при широкополосной хаотической накачке в газах [24] и оптических волокнах [26].

С целью количественной характеристики того, насколько случайные процессы, представленные РПВ на рис. 3, соответствуют статистике экстремальных значений, мы рассчитали для них значения коэффициентов Парето K_{par} , которые были определены как отношения суммы 20 % событий, имеющих максимальные значения в каждой выборке данных, к сумме всех событий данной выборки. Известно, что $K_{\text{par}} = 0,44$ для случайного процесса, описываемого нормальным РПВ, в то время как $K_{\text{par}} > 0,5$ обычно связывают с резко отличной от гауссовой статистикой, характеризующейся РПВ L-вида [10, 18]. Определенные таким образом значения K_{par} составили 0,585, 0,965, 0,992, 0,9992 и $>0,9995$ для наборов событий, представленных РПВ на рис. 2, *c*, рис. 3, *d, h*, рис. 3, *c, g*, рис. 3, *a, e* и рис. 3, *b, f* соответственно. Чтобы представить себе, насколько большой разброс значений случайной величины в них, отметим, что, например, в последних двух из перечисленных наборов с вероятностью $\sim 10^{-3}$ возможно возникновение событий, в которых энергия импульсов в 80–110 раз может превышать свои средние значения.

Следует отметить, что результаты наших расчетов, выполненные для тех же условий, но в отсутствие оптической обратной связи (при нулевых коэффициентах отражения зеркал резонатора) ВКР-лазера, демонстрируют значительно меньший разброс энергий импульсов генерации (в 1,5–2 раза) в близком к линейному режиму ВКР, когда эффективности преобразования не превышают 1 %. Качественно это согласуется с известными литературными данными по статистике флуктуаций энергий импульсов однопроходного ВКР в условиях широкополосной накачки [24, 26]. В настоящее время у нас нет однозначной интерпретации обнаруженного эффекта

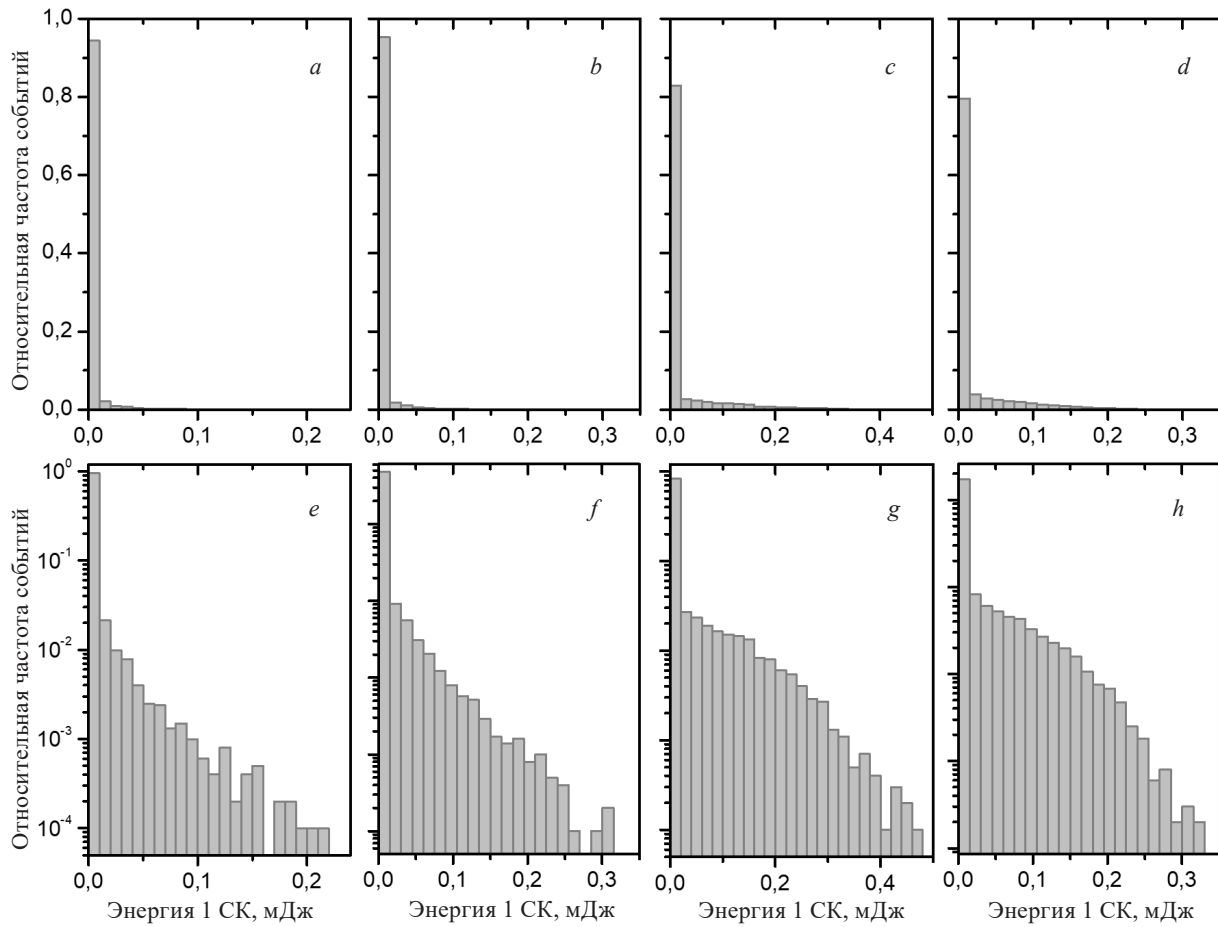


Рис. 3. Рассчитанные (*a, c, e, g*) и экспериментально измеренные (*b, d, f, h*) РПВ энергий импульсов 1 СК, представленные в линейном (*a–d*) и логарифмическом (*e–h*) масштабах, когда $L_R / L_P = 1,0$, а $E_P = 8$ мДж (*a, b, e, f*), $E_P = 10$ мДж (*c, g*), $E_P = 11$ мДж (*d, h*); средние значения эффективностей преобразования в излучение 1 СК составляли 0,03 % (*a, e*), 0,04 % (*b, f*), 0,2 % (*c, g*), 0,3 % (*d, h*), соответствующие средние энергии импульсов 1 СК составляли 2,5 мкДж (*a, e*), 2,8 мкДж (*b, f*), 21 мкДж (*c, g*), 29 мкДж (*d, h*), а значения C_v были равны 494 % (*a, e*), 484 % (*b, f*), 266 % (*c, g*) и 239 % (*d, h*)

Fig. 3. Calculated (*a, c, e, g*) and experimentally measured (*b, d, f, h*) 1st Stokes pulse energy PDDs, represented in the linear (*a–d*) and logarithmic (*e–h*) scales, when $L_R / L_P = 1.0$ and $E_P = 8$ mJ (*a, b, e, f*), $E_P = 10$ mJ (*c, g*), $E_P = 11$ mJ (*d, h*); the mean 1st Stokes conversion efficiencies were 0.03 % (*a, e*), 0.04 % (*b, f*), 0.2 % (*c, g*), 0.3 % (*d, h*), the corresponding mean 1st Stokes pulse energies were 2.5 μJ (*a, e*), 2.8 μJ (*b, f*), 21 μJ (*c, g*), 29 μJ (*d, h*), and the C_v values were equal to 494 % (*a, e*), 484 % (*b, f*), 266 % (*c, g*), and 239 % (*d, h*)

возрастания амплитуды флуктуаций энергий стоксовых импульсов при ВКР в условиях оптической обратной связи. Возможное объяснение этому заключается во влиянии многолучевой интерференции на зеркалах резонатора ВКР-лазера, которая приводит к дополнительным флуктуациям интенсивности излучения накачки внутри него. Такие флуктуации возникают ввиду того, что фазовые соотношения для различных компонент интерферирующих волн накачки варьируются от выстрела к выстрелу как по причине флуктуаций спектра импульса накачки, так и из-за изменения оптической длины L_R вследствие механических вибраций зеркал резонатора ВКР-лазера. Рост амплитуды флуктуаций энергий импульсов накачки, вызванный эффектом многолучевой интерференции на зеркалах резонатора ВКР-лазера, ранее был обнаружен при возбуждении ВКР спектрально-ограниченными лазерными импульсами [33].

Заключение. В работе исследована статистика флуктуаций энергий импульсов генерации 1 СК твердотельного ВКР-лазера при накачке наносекундными многомодовыми импульсами. Для надпорогового режима работы ВКР-лазера, когда эффективность преобразования энергии

накачки в излучение 1 СК составляет несколько процентов, результаты численного моделирования выявили увеличение амплитуды флуктуаций более чем на порядок величины, если оптическая длина резонатора ВКР-лазера согласована с длиной резонатора лазера накачки. Эти результаты позволили также установить, что статистика флуктуаций должна быть существенно негауссова и характеризоваться РПВ L-вида с максимумом вблизи нуля и коэффициентом вариации C_v , достигающим 140 %. С падением эффективности преобразования в стоксовое излучение численные результаты показали увеличение относительной амплитуды флуктуаций и рост значений C_v . Результаты расчетов были количественно подтверждены экспериментальными данными для ВКР-лазера на кристалле нитрата бария. Для припорогового режима работы ВКР-лазера они продемонстрировали возможность реализации сверххаотичного режима работы такого лазера, при котором амплитуда флуктуаций энергий импульсов его генерации приближается к 500 %, что в 2–2,5 раза превышает ранее наблюдаемые значения C_v для условий однопроходного ВКР.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № Ф20Р-064.

Acknowledgements. The work was carried out under the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research within the framework of project no. Ф20Р-064.

Список использованных источников

1. Walker, D. A. G. The shape of large surface waves on the open sea and the Draupner New Year wave / D. A. G Walker, P. H Taylor., R. E Taylor // *Appl. Ocean Res.* – 2004. – Vol. 26, № 3/4. – P. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2005.02.001>
2. Statistics of Extreme Events with Application to Climate / H. Abarbanel [et al.] // *JASON.* – 1992. – JSR-90-30S. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2005.02.001>
3. Alvarado, E. Modeling Large Forest Fires as Extreme Events / E. Alvarado, D. V. Sandberg, S. G. Pickford // *Northwest Sci.* – 1998. – Vol. 72. – P. 66–75.
4. Embrechts, P. Statistical Methods for Extremal Events / P. Embrechts, C. Klüppelberg, T. Mikosch // *Modelling extremal events for insurance and finance.* – Berlin: Springer Verlag, 1997. – P. 283–370. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33483-2>
5. Collision prediction in roundabouts: a comparative study of extreme value theory approaches / F. Orsini [et al.] // *Transportmetrica A: Transport Science.* – 2019. – Vol. 15, № 2. – P. 556–572. <https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1515271>
6. Carreras, B. A. North American Blackout Time Series Statistics and Implications for Blackout Risk / B. A. Carreras, D. E. Newman, I. Dobson // *IEEE Trans. Power Syst.* – 2016. – Vol. 31, № 6. – P. 4406–4414. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2510627>
7. Extreme Value Based Estimation of Critical Single Event Failure Probability [Electronic Resource] / G. I. Zebrev [et al.] // arXiv. – 2019. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1909.07804v1>
8. Optical rogue waves / D. R Solli [et al.] // *Nature.* – 2007. – Vol. 450, № 7172. – P. 1054–1058. <https://doi.org/10.1038/nature06402>
9. Spatiotemporal Rogue Events in Optical Multiple Filamentation / S. Birkholz [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – Vol. 111, № 24. – P. 243903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.243903>
10. Optical rogue wave statistics in laser filamentation / J. Kasparian [et al.] // *Opt. Expr.* – 2009. – Vol. 17, № 14. – P. 1270–1275. <https://doi.org/10.1364/OE.17.012070>
11. Non-Gaussian statistics and extreme waves in a nonlinear optical cavity / A. Montina [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – Vol. 103, № 17. – P. 173901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.173901>
12. Hammani, K. Emergence of extreme events in fiber-based parametric processes driven by a partially incoherent pump wave / K. Hammani, C. Finot, G. Millot // *Opt. Lett.* – 2009. – Vol. 34, № 8. – P. 1138–1140. <https://doi.org/10.1364/OL.34.001138>
13. Soto-Crespo, J. M. Dissipative rogue waves: extreme pulses generated by passively mode-locked lasers / J. M. Soto-Crespo, Ph. Grelu, N. Akhmediev // *Phys. Rev. E.* – 2011. – Vol. 84, № 1. – P. 016604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.016604>
14. MacPherson, D. C. Quantum Fluctuations in the Stimulated-Raman-Scattering Linewidth / D. C. MacPherson, R. C. Swanson, J. L. Carlsten // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 61, № 1. – P. 66–69. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.66>
15. Raymer, M. G. Temporal quantum fluctuations in stimulated Raman scattering: Coherent-modes description / M. G. Raymer, Z. W. Li, I. A. Walmsley // *Phys. Rev. Lett.* – 1989. – Vol. 63, № 15. – P. 1586–1589. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.1586>
16. Control of transverse spatial modes in transient stimulated Raman amplification / M. D. Duncan [et al.] // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1990. – Vol. 7, № 7. – P. 1336–1345. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.7.001336>
17. Hammani, K. Extreme statistics in Raman fiber amplifiers: From analytical description to experiments / K. Hammani, A. Picozzi, C. Finot // *Opt. Commun.* – 2011. – Vol. 284, № 10/11. – P. 2594–2603. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.01.057>
18. Aalto, A. Extreme-value statistics in supercontinuum generation by cascaded stimulated Raman scattering / A. Aalto, G. Genty, J. Toivonen // *Opt. Expr.* – 2010. – Vol. 18, № 2. – P. 1234–1239. <https://doi.org/10.1364/OE.18.001234>

19. Monfared, Y. E. Non-Gaussian statistics and optical rogue waves in stimulated Raman scattering / Y. E. Monfared, S. A. Ponomarenko // *Opt. Expr.* – 2017. – Vol. 25, № 6. – P. 5941–5950. <https://doi.org/10.1364/OE.25.005941>
20. Fabricius, N. Macroscopic Manifestation of Quantum Fluctuations in Transient Stimulated Raman Scattering / N. Fabricius, K. Nattermann, D. von der Linde // *Phys. Rev. Lett.* – 1984. – Vol. 52, № 2. – P. 113–116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.52.113>
21. Walmsley, I. A. Observation of Macroscopic Quantum Fluctuations in Stimulated Raman Scattering / I. A. Walmsley, M. G. Raymer // *Phys. Rev. Lett.* – 1983. – Vol. 50, № 13. – P. 962–965. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.962>
22. Raymer, M. G. III The quantum coherence properties of stimulated Raman scattering / M. G. Raymer, I. A. Walmsley // *Progr. Opt.* – 1990. – Vol. 28. – P. 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70290-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70290-7)
23. Statistical characteristics of the energies of pulses of forward and backward stimulated Raman scattering under linear, intermediate, and nonlinear scattering conditions / P. A. Apanasevich [et al.] // *Sov. J. of Quant. Electron.* – 1992. – Vol. 22, № 9. – P. 822–827. <https://doi.org/10.1070/qe1992v022n09abeh003607>
24. Grabtchikov, A. S. Pulse-energy statistics in the linear regime of stimulated Raman scattering with a broad-band pump / A. S. Grabtchikov, A. I. Vodtchits, V. A. Orlovich // *Phys. Rev. A.* – 1997. – Vol. 56, № 2. – P. 1666–1669. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.56.1666>
25. Borlaug, D. Extreme Value Statistics in Silicon Photonics / D. Borlaug, S. Fathpour, B. Jalali // *IEEE Phot. J.* – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 33–39. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2009.2025517>
26. Increased Stokes pulse energy variation from amplified classical noise in a fiber Raman generator / A. Betlej [et al.] // *Opt. Expr.* – 2005. – Vol. 13, № 8. – P. 2948–2960. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.002948>
27. First Stokes pulse energy statistics for cascade Raman generation in optical fiber / J. Chang [et al.] // *Opt. Commun.* – 1997. – Vol. 139, № 4/6. – P. 227–231. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(97\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(97)00060-6)
28. Headley, C. Noise Characteristics and Statistics of Picosecond Stokes Pulses Generated in Optical Fibers Through Stimulated Raman Scattering / C. Headley, G. P. Agrawal // *IEEE J. Quant. Electr.* – 1995. – Vol. 31, № 11. – P. 2058–2067. <https://doi.org/10.1109/3.469288>
29. Physical, chemical, and optical properties of barium nitrate Raman crystal / P. G. Zverev [et al.] // *Opt. Mater.* – 1999. – Vol. 11, № 4. – P. 315–334. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(98)00031-7)
30. Self-mode locking at multiple Stokes generation in the Raman laser / V. A. Lisinetskii [et al.] // *Opt. Commun.* – 2010. – Vol. 283, № 7. – P. 1454–1458. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.11.047>
31. Battle, P. R. Quantum limit on noise in a Raman amplifier / P. R. Battle, R. C. Swanson, J. L. Carlsten // *Phys. Rev. A.* – 1991. – Vol. 44, № 3. – P. 1992–1930. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.1922>
32. Карамзин, Ю. Н. Математическое моделирование в нелинейной оптике / Ю. Н. Карамзин, А. П. Сухоруков, В. А. Трофимов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 154 с.
33. Steady-state Raman gain coefficients of potassium-gadolinium tungstate at the wavelength of 532 nm / R. V. Chulkov [et al.] // *Opt. Mater.* – 2015. – Vol. 50. – P. 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.10.004>
34. Raman gain coefficient of barium nitrate measured for the spectral region of Ti:Sapphire laser / V. A. Lisinetskii [et al.] // *J. Nonlin. Opt. Phys. & Mater.* – 2005. – Vol. 14, № 1. – P. 107–114. <https://doi.org/10.1142/s0218863505002530>
35. Cavity length matching and optical resonances in a Raman laser with the multimode pump source / R. V. Chulkov [et al.] // *Opt. Lett.* – 2017. – Vol. 42, № 23. – P. 4824–4827. <https://doi.org/10.1364/OL.42.004824>
36. Statistical characteristics of the pulse energies for forward and backward SRS in linear, intermediate, and nonlinear scattering modes / P. A. Apanasevich [et al.] // *Quant. Electron.* – 1992. – Vol. 19. – P. 884–890.

References

1. Walker D. A. G., Taylor P. H., Taylor R. E. The shape of large surface waves on the open sea and the Draupner New Year wave. *Applied Ocean Research*, 2004, vol. 26, no. 3–4, pp. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2005.02.001>
2. Abarbanel H., Koonin S., Levine H., MacDonald G., Rothaus O. Statistics of Extreme Events with Application to Climate. *JASON*, 1992, JSR-90-30S. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2005.02.001>
3. Alvarado E., Sandberg D. V., Pickford S. G. Modeling Large Forest Fires as Extreme Events. *Northwest Science*, 1998, vol. 72, pp. 66–75.
4. Embrechts P., Klüppelberg C., Mikosch T. Statistical Methods for Extremal Events. *Modelling extremal events for insurance and finance*. Berlin, Springer Verlag, 1997, pp. 283–370. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33483-2>
5. Orsini F., Gecchele G., Gastaldi M., Rossi R. Collision prediction in roundabouts: a comparative study of extreme value theory approaches. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 556–572. <https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1515271>
6. Carreras B. A., Newman D. E., Dobson I. North American Blackout Time Series Statistics and Implications for Blackout Risk. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, no. 6, pp. 4406–4414. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2510627>
7. Zebrev G. I., Galimov A. M., Useinov R. G., Fateev I. A. Extreme Value Based Estimation of Critical Single Event Failure Probability. *arXiv*, 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1909.07804v1>
8. Solli D. R., Ropers C., Koonath P., Jalali B. Optical rogue waves, *Nature*, 2007, vol. 450, no. 7172, pp. 1054–1058. <https://doi.org/10.1038/nature06402>

9. Birkholz S., Nibbering E. T. J., Brée C., Skupin S., Demircan A., Genty G., Steinmeyer G. Spatiotemporal Rogue Events in Optical Multiple Filamentation. *Physical Review Letters*, 2013, vol. 111, no. 24, pp. 243903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.243903>
10. Kasparian J., BÉjot P., Wolf J-P., Dudley J. M. Optical rogue wave statistics in laser filamentation. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 14, pp. 1270–1275. <https://doi.org/10.1364/OE.17.012070>
11. Montina A., Bortolozzo U., Residori S., Arecchi F. T. Non-Gaussian statistics and extreme waves in a nonlinear optical cavity. *Physical Review Letters*, 2009, vol. 103, no. 17, pp. 173901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.173901>
12. Hammani K., Finot C., Millot G. Emergence of extreme events in fiber-based parametric processes driven by a partially incoherent pump wave. *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 1138–1140. <https://doi.org/10.1364/OL.34.001138>
13. Soto-Crespo J. M., Grelu Ph., Akhmediev N. Dissipative rogue waves: extreme pulses generated by passively mode-locked lasers. *Physical Review E*, 2011, vol. 84, no. 1, pp. 016604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.016604>
14. MacPherson D. C., Swanson R. C., Carlsten J. L. Quantum Fluctuations in the Stimulated-Raman-Scattering Linewidth. *Physical Review Letters*, 1988, vol. 61, no. 1, pp. 66–69. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.66>
15. Raymer M. G., Li Z. W., Walmsley I. A. Temporal quantum fluctuations in stimulated Raman scattering: Coherent-modes description. *Physical Review Letters*, 1989, vol. 63, no. 15, pp. 1586–1589. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.1586>
16. Duncan M. D., Mahon R., Tankersley L. L., Reintjes J. Control of transverse spatial modes in transient stimulated Raman amplification. *Journal of the Optical Society of America B*, 1990, vol. 7, no. 7, pp. 1336–1345. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.7.001336>
17. Hammani K., Picozzi A., Finot C., Extreme statistics in Raman fiber amplifiers: From analytical description to experiments. *Optics Communications*, 2011, vol. 284, no. 10–11, pp. 2594–2603. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.01.057>
18. Aalto A., Genty G., Toivonen J. Extreme-value statistics in supercontinuum generation by cascaded stimulated Raman scattering. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 2, pp. 1234–1239. <https://doi.org/10.1364/OE.18.001234>
19. Monfared Y. E., Ponomarenko S. A. Non-Gaussian statistics and optical rogue waves in stimulated Raman scattering. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 6, pp. 5941–5950. <https://doi.org/10.1364/OE.25.005941>
20. Fabricius N., Nattermann K., D. von der Linde. Macroscopic Manifestation of Quantum Fluctuations in Transient Stimulated Raman Scattering. *Physical Review Letters*, 1984, vol. 52, no. 2, pp. 113–116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.52.113>
21. Walmsley I. A., Raymer M. G. Observation of Macroscopic Quantum Fluctuations in Stimulated Raman Scattering. *Physical Review Letters*, 1983, vol. 50, no. 13, pp. 962–965. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.962>
22. Raymer M. G., Walmsley I. A. III The quantum coherence properties of stimulated Raman scattering, *Progress in Optics*, 1990, vol. 28, pp. 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70290-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70290-7)
23. Apanasevich P. A., Gakhovich D. E., Grabchikov A. S., Kilin S. Y., Kozich V. P., Kontsevoi B. L., Orlovich V. A. Statistical characteristics of the energies of pulses of forward and backward stimulated Raman scattering under linear, intermediate, and nonlinear scattering conditions. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1992, vol. 22, no. 9, pp. 822–827. <https://doi.org/10.1070/qe1992v022n09abeh003607>
24. Grabchikov A. S., Vodtchits A. I., Orlovich V. A. Pulse-energy statistics in the linear regime of stimulated Raman scattering with a broad-band pump. *Physical Review A*, 1997, vol. 56, no. 2, pp. 1666–1669. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.56.1666>
25. Borlaug D., Fathpour S., Jalali B. Extreme Value Statistics in Silicon Photonics. *IEEE Photonics Journal*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 33–39. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2009.2025517>
26. Betlej A., Schmitt P., Sidereas P., Tracy R., Goedde C. G., Thompson J. R. Increased Stokes pulse energy variation from amplified classical noise in a fiber Raman generator. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 8, pp. 2948–2960. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.002948>
27. Chang J., Baiocchi D., Vas J., Thompson J. R. First Stokes pulse energy statistics for cascade Raman generation in optical fiber. *Optics Communications*, 1997, vol. 139, no. 4–6, pp. 227–231. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(97\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(97)00060-6)
28. Headley C., Agrawal G. P. Noise Characteristics and Statistics of Picosecond Stokes Pulses Generated in Optical Fibers Through Stimulated Raman Scattering. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, vol. 31, no. 11, pp. 2058–2067. <https://doi.org/10.1109/3.469288>
29. Zverev P. G., Basiev T. T., Osiko V. V., Kulkov A. M., Voitsekhovskii V. N. Physical, chemical, and optical properties of barium nitrate Raman crystal. *Optical Materials*, 1999, vol. 11, no. 4, pp. 315–334. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(98)00031-7)
30. Lisinetskii V. A., Busko D. N., Chulkov R. V., Grabchikov A. S., Apanasevich P. A., Orlovich V. A. Self-mode locking at multiple Stokes generation in the Raman laser. *Optics Communications*, 2010, vol. 283, no. 7, pp. 1454–1458. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.11.047>
31. Battle P. R., Swanson R. C., Carlsten J. L. Quantum limit on noise in a Raman amplifier. *Physical Review A*, 1991, vol. 44, no. 3, pp. 1992–1930. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.1922>
32. Karamzin Y. N., Sukhorukov A. P., Trophimov V. A. *Mathematical Modeling in Nonlinear Optics*. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1989. 154 p. (in Russian).
33. Chulkov R. V., Markevich V. Y., Orlovich V. A., El-Desouki M. M. Steady-state Raman gain coefficients of potassium-gadolinium tungstate at the wavelength of 532 nm. *Optical Materials*, 2015, vol. 50, pp. 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.10.004>
34. Lisinetskii V. A., Mishkel' I. I., Chulkov R. V., Grabchikov A. S., Apanasevich P. A., Eichler H. J., Orlovich V. A. Raman gain coefficient of barium nitrate measured for the spectral region of Ti:Sapphire laser. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2005, vol. 14, no. 1, pp. 107–114. <https://doi.org/10.1142/s0218863505002530>

35. Chulkov R. V., Markevich V. Y., Alyamani A. Y., Cheshev E. A., Orlovich V. A. Cavity length matching and optical resonances in a Raman laser with the multimode pump source. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 23, pp. 4824–4827. <https://doi.org/10.1364/OL.42.004824>

36. Apanasevich P. A., Gakhovich D. E., Killin S. Y., Kozich V. P., Kontsevoi B. L., Orlovich V. A. Statistical characteristics of the pulse energies for forward and backward SRS in linear, intermediate, and nonlinear scattering modes. *Quantum Electronics*, 1992, vol. 19, pp. 884–890.

Информация об авторах

Чулков Руслан Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий центром «Нелинейная оптика и активированные материалы», Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: r.chulkov@dragon.bas-net.by

Корожан Ольга Петровна – младший научный сотрудник центра «Нелинейная оптика и активированные материалы», Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.korozhan@dragon.bas-net.by

Орлович Валентин Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, академик-секретарь Отделения физики, математики и информатики Национальной академии наук Беларуси, научный руководитель центра «Нелинейная оптика и активированные материалы», Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by

Information about the authors

Ruslan V. Chulkov – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Center “Nonlinear optics and activated materials”, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Nezavisimosti Ave., 68-2, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: r.chulkov@dragon.bas-net.by

Olga P. Korozhan – Junior Researcher at the Center “Nonlinear optics and activated materials”, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Nezavisimosti Ave., 68-2, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.korozhan@dragon.bas-net.by

Valentin A. Orlovich – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Academician-Secretary of the Department of Physics, Mathematics and Informatics of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus, Supervisor of the Center “Nonlinear optics and activated materials”, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Nezavisimosti Ave., 68-2, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by