

Расчет оптики для работы квантового канала системы атмосферного квантового распределения ключей в дневное время



НЕВСКАЯ
ФОТОНИКА

Вахрушева В.М.^{1,2}, Климов А.Н.¹

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² ООО «СФБ Лаб», Москва, Россия

vmvakhrusheva@gmail.com



infotecs

MSU
Quantum
Technology
Centre

ВВЕДЕНИЕ

Особенность работы систем атмосферного квантового распределению ключей (АКРК) в дневное время заключается в присутствии фоновой засветки. Следовательно, при разработке системы АКРК необходимо учитывать не только потери сигнала в оптическом канале, но и отношение величины полезного сигнала к уровню излучения засветки, приходящего на однофотонный детектор, то есть отношение сигнал/шум (SNR). Критерием качества работы систем КРК служит величина ошибок в просеянном ключе (QBER), рабочее значение которой составляет несколько процентов, что для протокола BB84 соответствует SNR, равному 30-50.

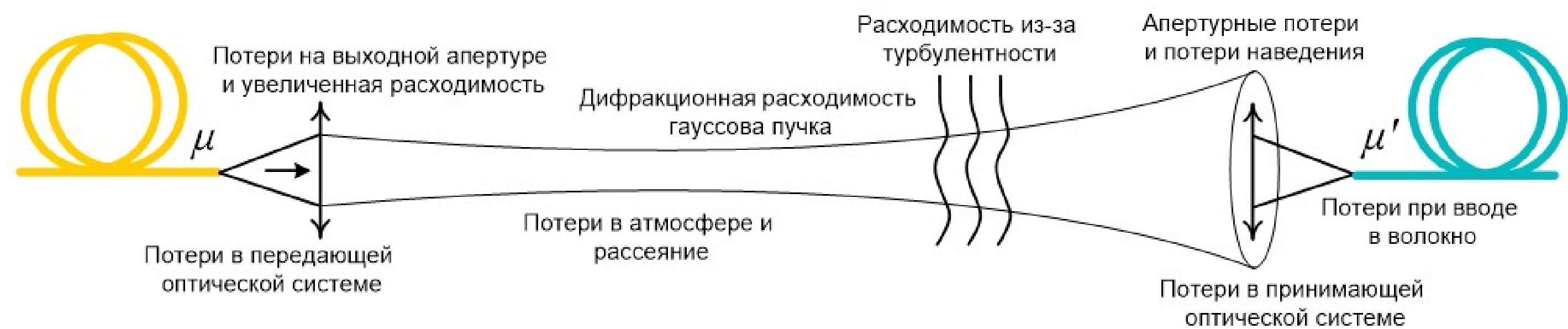
В силу однофотонного характера полезного квантового сигнала SNR не может быть увеличен за счет повышения его интенсивности, поэтому основными задачами при проектировании оптических систем АКРК являются, с одной стороны, уменьшение потерь полезного сигнала, а с другой – ограничение излучения засветки с помощью спектральной, пространственной и временной фильтрации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

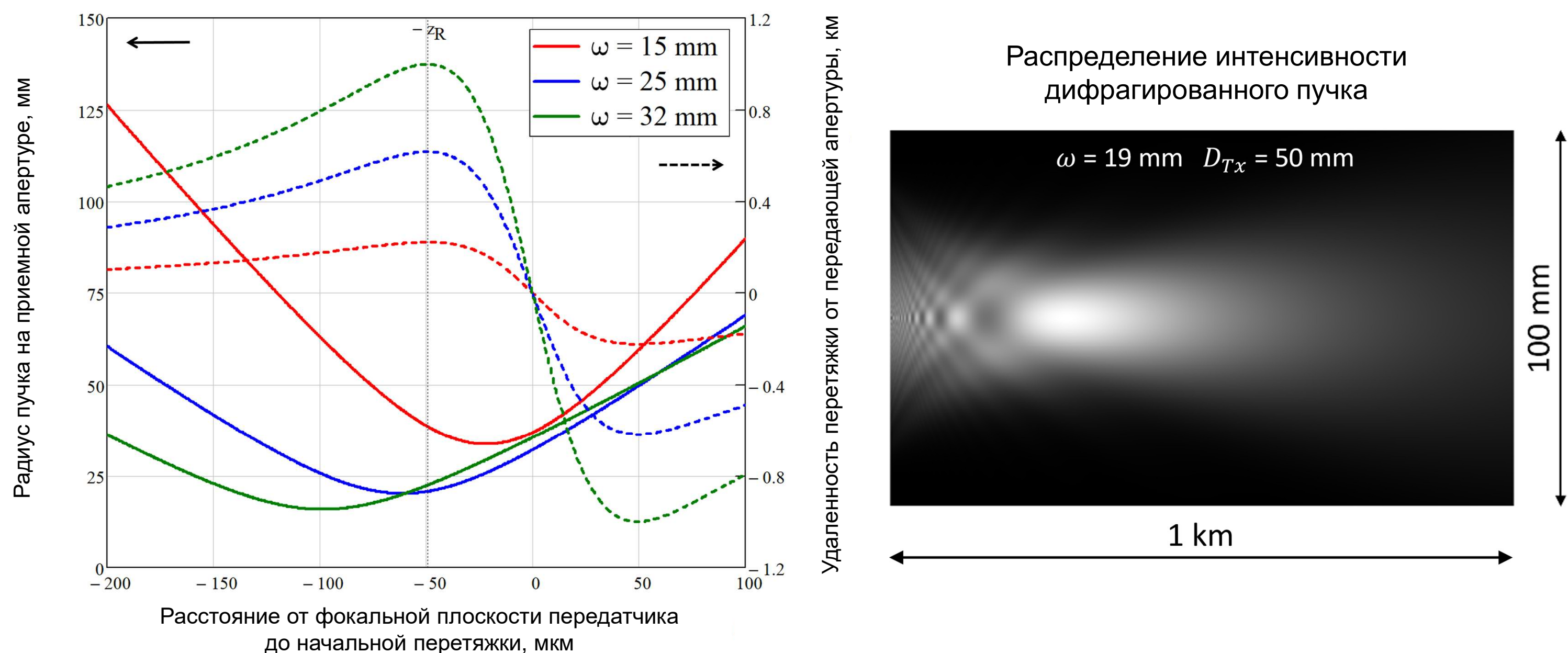
Моделировалась система АКРК, работающая на протоколе BB84 с фазовым кодированием. Расчет передающей и приемной оптических систем проводился для обеспечения рабочей дистанции не менее 1 км. Длина волны квантового канала составляет 1550 нм.

Оценка потерь

Источником квантового канала обычно служит ослабленное лазерное излучение, которое распространяется в виде гауссова пучка. При этом в канале возникают потери, связанные с ограничением размеров передающей и приемной апертур, отражением от оптических компонентов, рассеянием и поглощением в атмосфере.



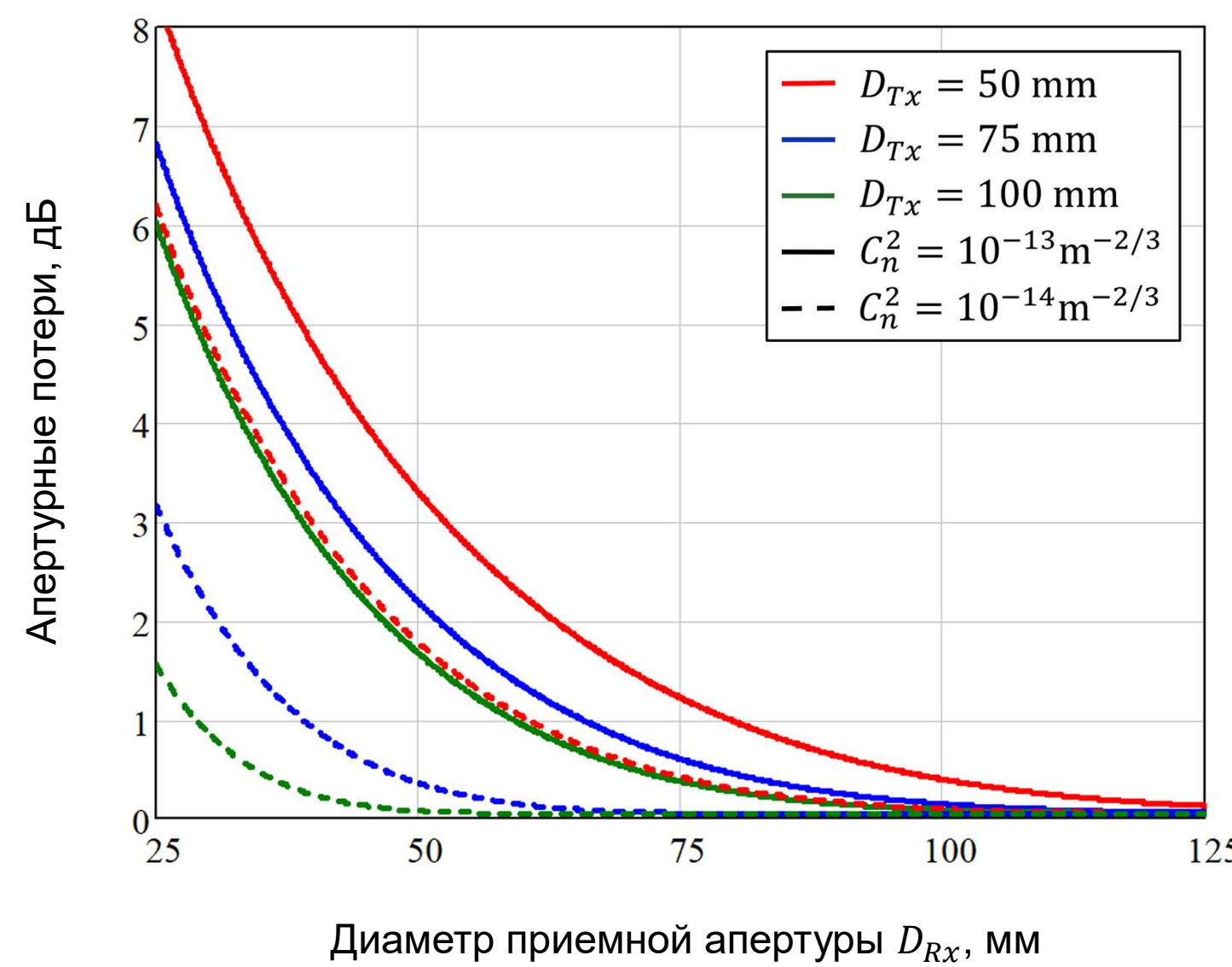
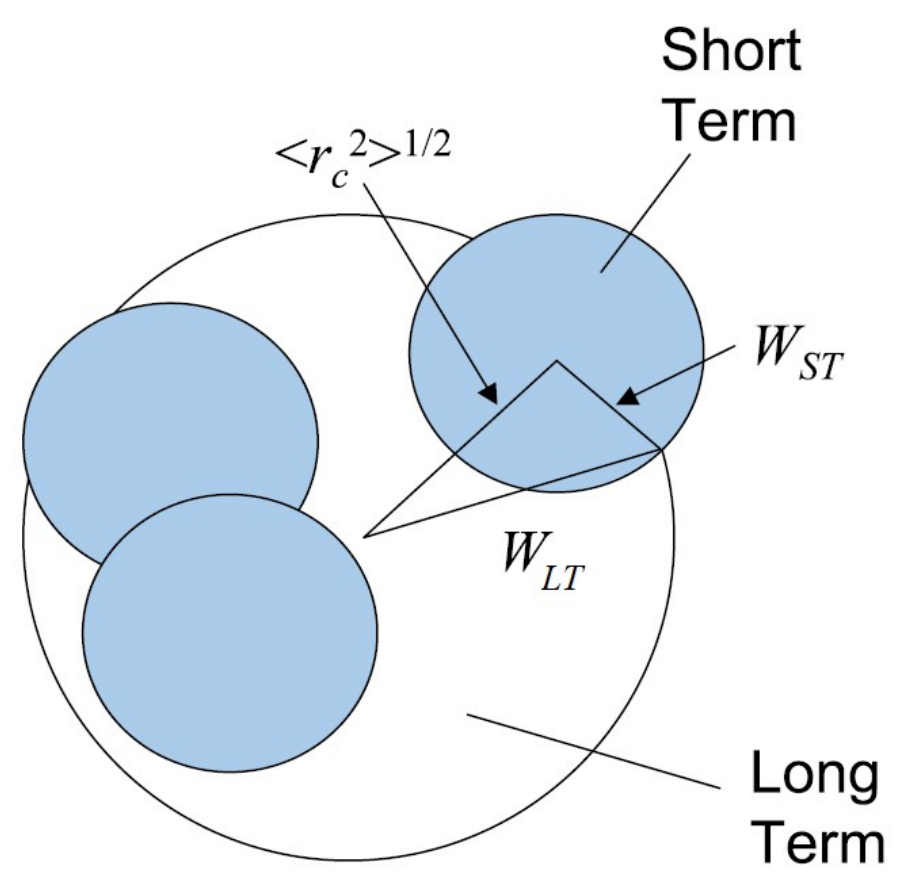
Для оценки величины апертурных потерь необходимо определить параметры пучка на выходе формирующей оптической системы передатчика [1] и учесть влияние дифракционных эффектов [2] и турбулентности на эти параметры.



Турбулентность атмосферы приводит к дополнительному уширению и блужданию пучка [3]. Система трекинга в передатчике корректирует положение пучка на апертуре приемника, в таком случае для расчета апертурных потерь используется усредненный за короткое время радиус W_{ST} . При отсутствии трекинга потери рассчитываются с учетом среднеквадратического смещения $\langle r_c^2 \rangle^{1/2}$.

$$W_{LT}(z) = \omega(z) \sqrt{1 + 1,63(\sigma_R^2)^{6/5} \left(\frac{2z}{k\omega^2(z)} \right)}$$

$$\langle r_c^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{W_{LT}^2 - W_{ST}^2} = \sqrt{2,42 \cdot C_n^2 z^3 \omega_0^{-1/3}}$$



Приемная оптическая система формирует в своей фокальной плоскости изображение пучка. В этой плоскости располагается торец оптического волокна, которое переносит излучение в интерферометр. Если размер пучка W_{ST} меньше радиуса входной апертуры, изображение пучка сохраняет гауссов профиль, а при полном заполнении апертуры – определяется дифракционным пределом и представляет собой функцию рассеяния точки. Турбулентность вносит aberrации в волновой фронт пучка, что приводит к уширению и смещению изображения [3].

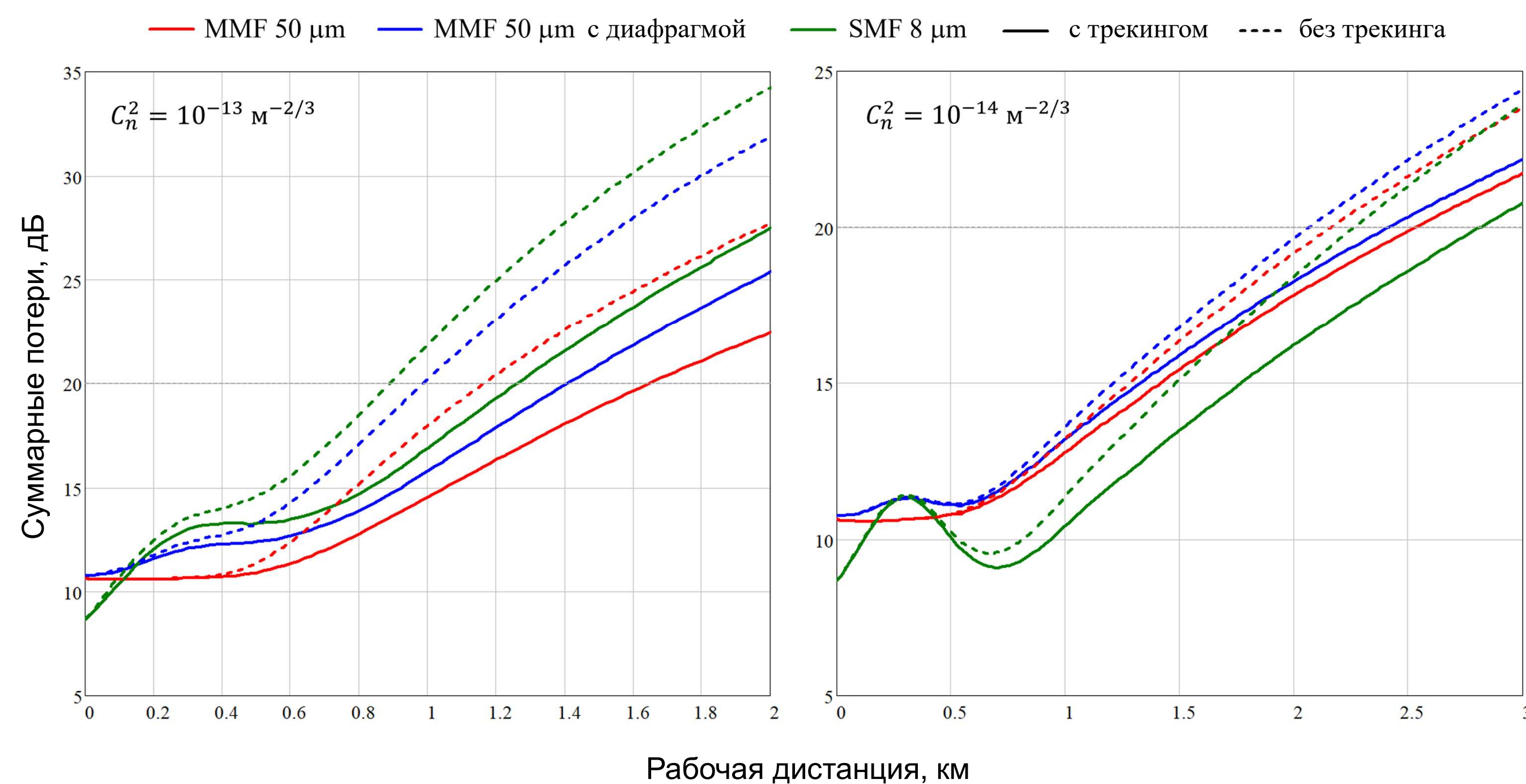
$$d_{turb} = \frac{2\lambda f'}{r_0}$$

$$\langle \varphi^2 \rangle = 2,91 D_{Rx}^{-1/3} C_n^2 z \quad \rightarrow \quad \delta = \langle \varphi^2 \rangle^{1/2} f'$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве приемного волокна может быть выбрано одномодовое (SMF) или многомодовое (MMF) волокно. Выбор MMF снижает потери на введение излучения в волокно, но приводит к существенному возрастанию засветки из-за большого углового поля. SMF позволяет снизить засветки и тем самым увеличить SNR, но требует более точной системы трекинга для заведения излучения в волокно.

Потери на введение излучения в волокно рассчитываются интегрированием изображения пучка по апертуре приемного волокна. Суммарные потери в квантовом канале при апертурах передатчика и приемника 50 мм, потерь на оптических компонентах 6 дБ для SMF и 10.5 дБ для MMF, а также затухания в атмосферном канале 0.44 дБ/км при дальности видимости 10 км:



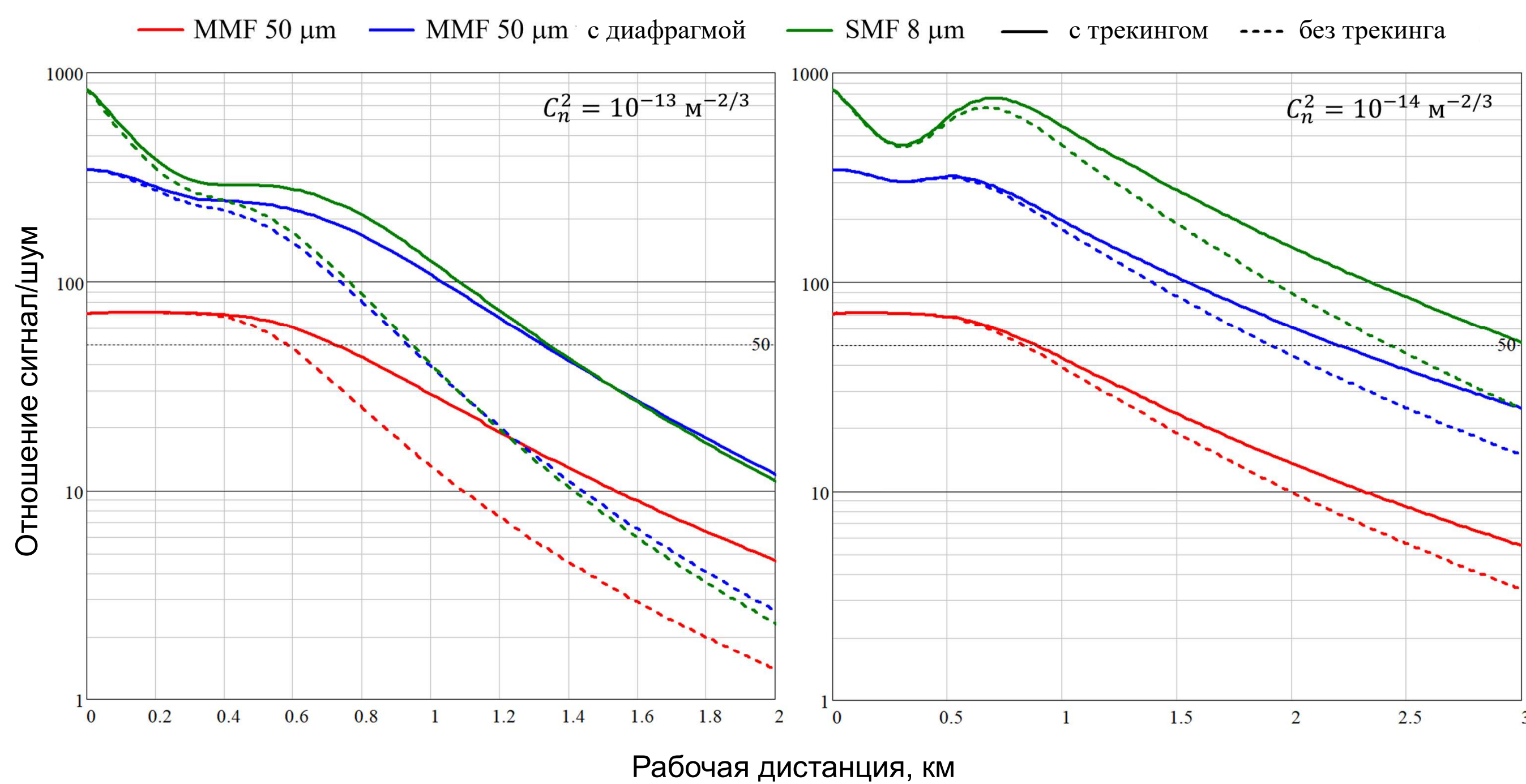
Отношение сигнал/шум

Для измерения числа регистрируемых фотонов засветки помимо параметров системы АКРК необходимо знать энергетические характеристики фонового излучения. Для этого было проведено измерение спектральной яркости $L_{e,\lambda}$ на 1550 нм шума от стен зданий и неба [4]. Максимальная яркость стены, освещенной солнцем и находящейся в тени, составила 28 и 8 мВт/м²/ср/нм соответственно. Выражения, для расчета числа сигнальных и шумовых фотонов, регистрируемых детектором:

$$N_s = 10^{-L_s/10} \mu \eta$$

$$N_b = \frac{L_{e,\lambda} \pi^2 (\theta D_{Rx})^2 \lambda \Delta \lambda \Delta t \eta T_{Rx}}{4hc}$$

Отношение сигнал/шум рассчитано при среднем числе фотонов на входе передающей оптической системы $\mu = 0.5$, ширине спектрального фильтра $\Delta \lambda = 1$ нм, длительности строка и квантовой эффективности приемника $\Delta t = 1$ нс и $\eta = 10\%$. Угловое поле θ определяется размером сердцевинки волокна и при необходимости может быть уменьшено введением полевой диафрагмы. Передатчик находится в тени.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выбор в качестве приемного волокна MMF без дополнительного ограничения углового поля не обеспечивает требуемого отношения сигнал шум в дневное время на расстояниях более 1 км даже в условиях умеренной турбулентности. Ограничение эффективного размера сердцевинки MMF до 25 мкм дает сравнимые результаты при использовании в качестве приемного волокна SMF из-за разницы в пропускании оптических компонентов одномодового и многомодового интерферометров.

Существенное влияние на суммарные потери и SNR системы АКРК на расстояниях более 1 км оказывает работа системы трекинга. При сильной турбулентности только коррекция среднего наклона волнового фронта в передатчике и приемнике позволяет снизить потери более чем на 5 дБ и повысить SNR в 2 раза. На основании проведенных расчетов был создан макет системы АКРК. Измеренные суммарные потери при длине канала 40 м составили 10 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

- Sun H., *Optical Engineering*, **37**(11), 2903-2913, (1998).
- Horvath Z.L., Bor Z., *Opt. Commun.*, **222**, 51-68, (2003).
- Andrews L.C., Beason M., *Laser Beam Propagation in Random Media: New and Advanced Topics*, SPIE Press, 422, (2023).
- Вахрушева В.М., Климов А.Н., Моисеева Е.А., Широбакин С.Е., *Оптика и спектроскопия*, **133**:2, 192–199, (2025)