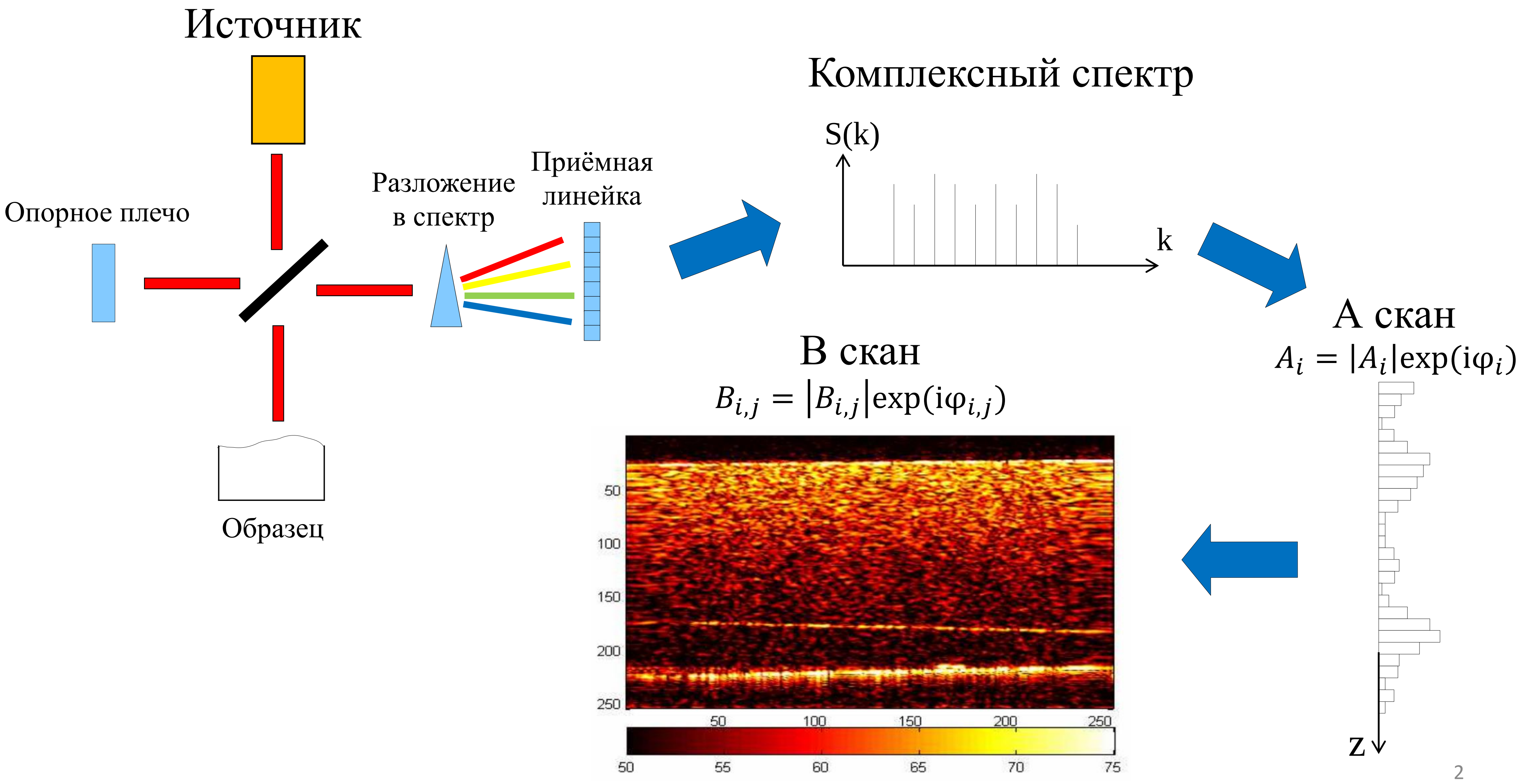
Численное моделирование динамики спекл-структуры ОКТ-сканов при регулярных и случайных движениях рассеивателей в контексте развития ОКТ-ангиографии

<u>Зыков А.А.</u>, Матвеев Л.А., Матвеев А.Л., Зайцев В.Ю.

Институт Прикладной Физики РАН,
Нижний Новгород

ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород

Получение изображения в спектральной ОКТ



Моделирование ОКТ изображения

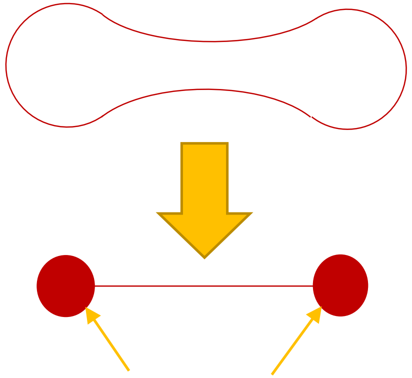
ОКТ изображение

$$A(q)=\sum_j\sum_n S(k_n)A_j exp(-i2k_n z_j)\, exp\left(i\frac{2\pi n}{H}z_q\right)$$

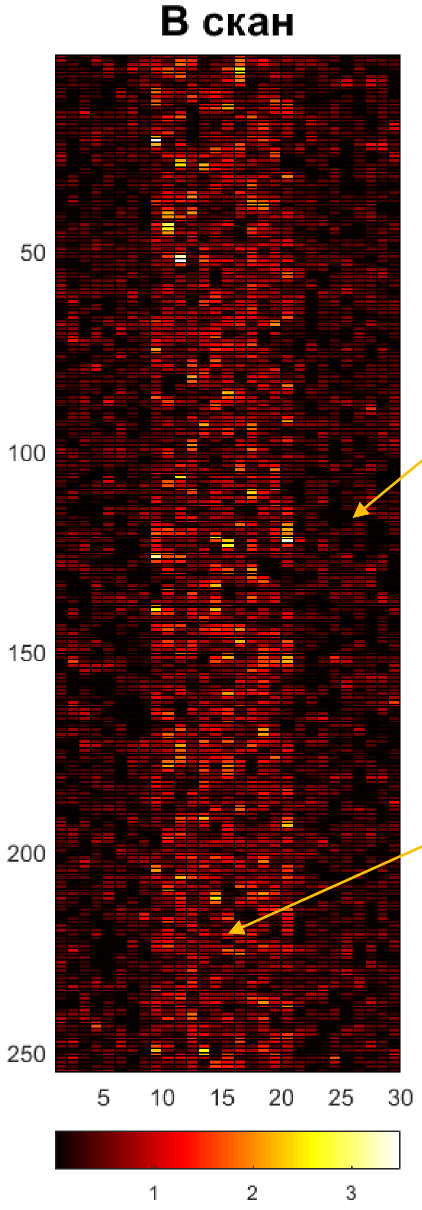
$$B_{i,j}=\left|B_{i,j}\right|\exp(\mathrm{i}\varphi_{i,j})$$

$$K(\tau)=\frac{\langle B^*(t)*B(t+\tau)\rangle}{\sqrt{\langle|B(t)|^2\rangle\langle|B(t+\tau)|^2\rangle}}$$

Эритроцит

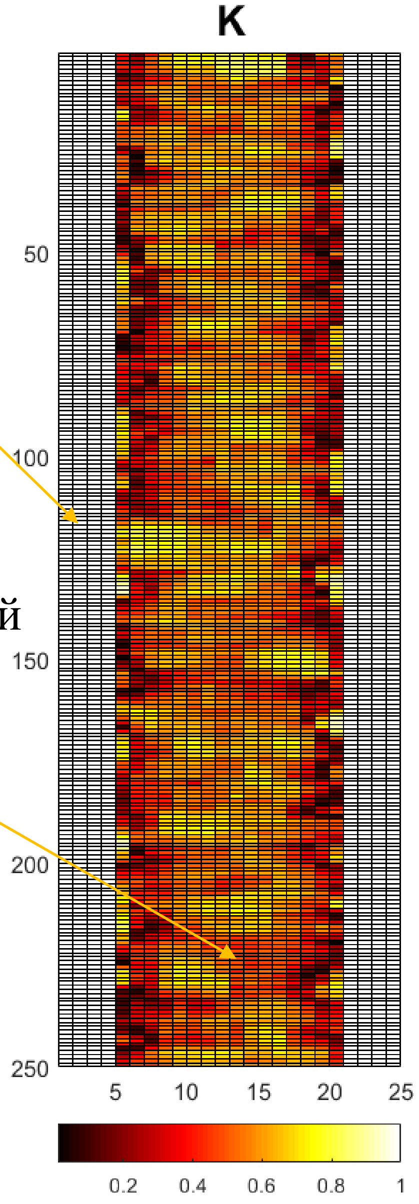


точечные рассеиватели



Статичная биоткань |K|=1

Кровеносный сосуд |K|<1

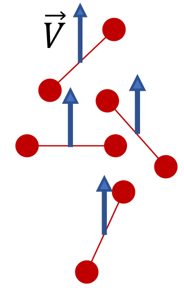


Моделирование движений эритроцитов

1) Потоковое смещение.

$\varphi_n = const$

$z_{Cn}(n+1) = z_{Cn}(n) + V * \Delta t$

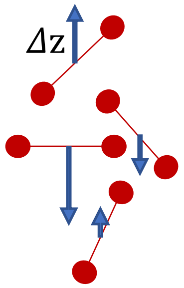


2) Броуновское поступательное движение.

$\varphi_n = const$

$z_{Cn}(n+1) = z_{Cn}(n) + \Delta z_n$

$$\rho(\Delta z_{Cn}) = \frac{1}{\sigma_{\Delta z}\sqrt{2\pi}} exp(\frac{-(\Delta z_{Cn} - z_{Cn})^2}{2\sigma_{\Delta z}})$$

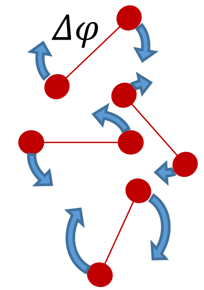


3) Броуновское вращательное движение.

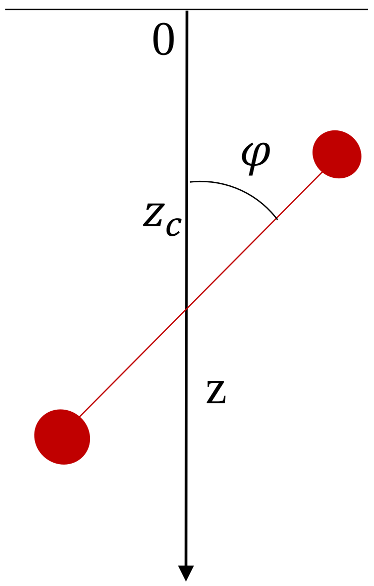
$z_{Cn} = const$

$\varphi_n(n+1) = \varphi_n(n) + \Delta\varphi_n,$

$$\rho(\Delta\varphi_n) = \frac{1}{\sigma_{\Delta\varphi}\sqrt{2\pi}} exp(\frac{-(\Delta\varphi_n - \varphi_n)^2}{2\sigma_{\Delta\varphi}})$$



Координаты «эритроцита»

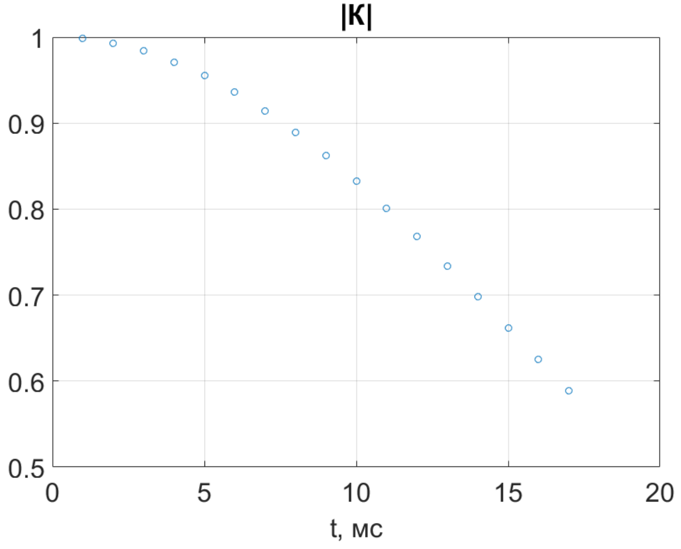


Получение аналитических аппроксимаций K(t)

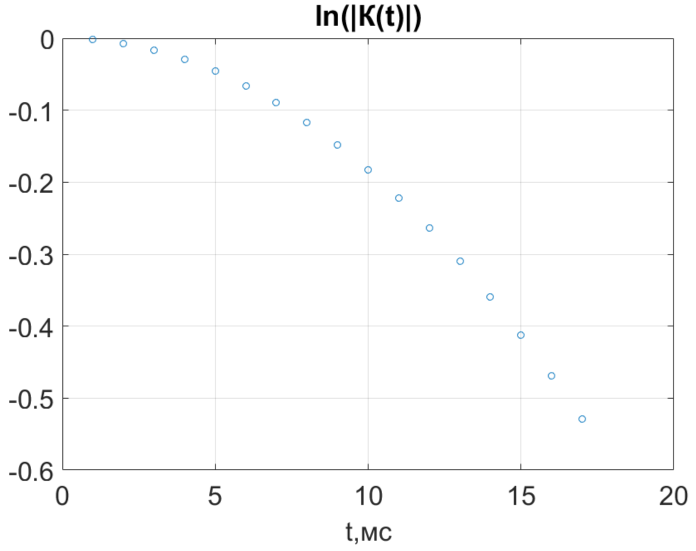
Ожидаемые зависимости вида:

$$K \sim exp(-at^n)$$

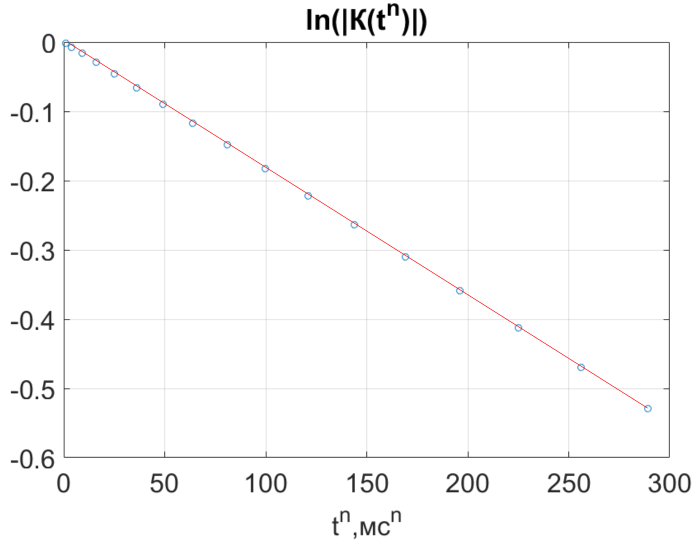
1) Вычисление K(t)



2) Вычисление ln(|K(t)|)



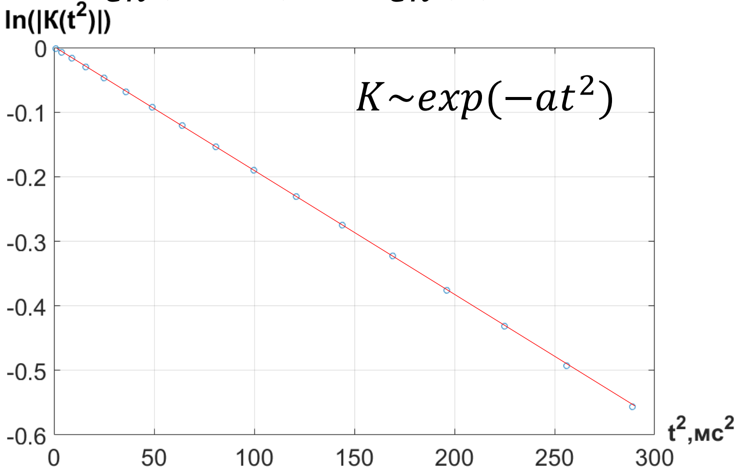
3) Если $\ln(|K(t^n)|)$ аппроксимируется прямой, то искомая зависимость найдена



Результаты

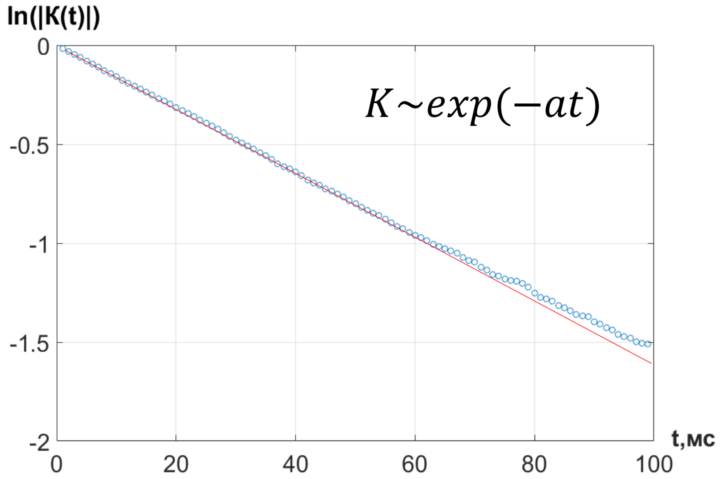
1) Потоковое смещение.

$$z_{Cn}(n+1) = z_{Cn}(n) + V\Delta t$$



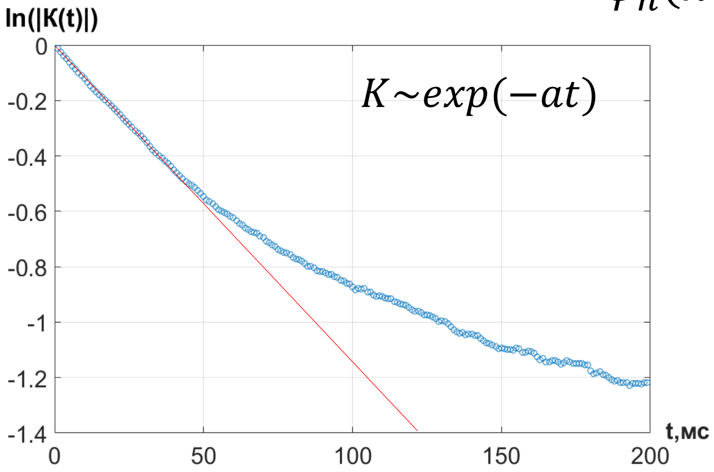
2) Броуновское поступательное движение.

$$z_{Cn}(n+1) = z_{Cn}(n) + \Delta z_n$$

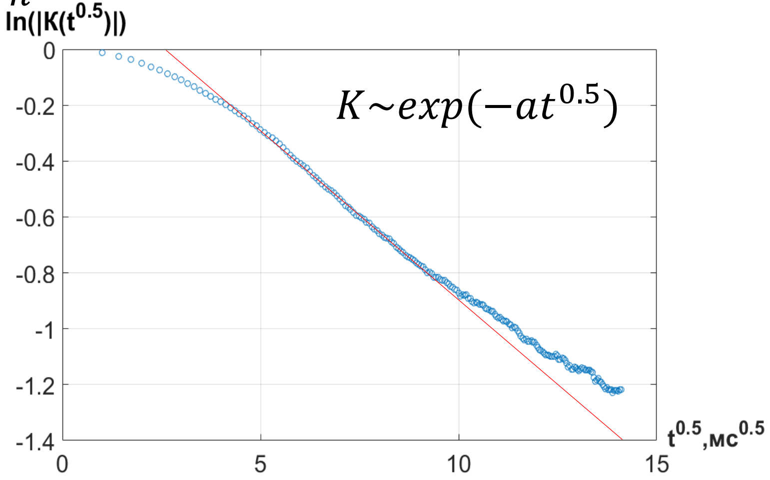


3) Броуновское вращательное движение.

$$\varphi_n(n+1) = \varphi_n(n) + \Delta\varphi_n$$



(малые времена)



(промежуточная асимптотика)

Обсуждение

В работе [1] получено приближенное аналитическое выражение временной зависимости корреляционной функции ОКТ сигнала для сферических частиц, испытывающих потоковое и Броуновское движение:

$$g(t) = exp\left(-\frac{t}{\tau_b}\right) exp\left(-\frac{t^2}{\tau_t^2}\right) exp(2ikv_z t)$$

потоковое смещение Броуновское движение

$$|g(t)| = \left|exp\left(-\frac{t}{\tau_b}\right) exp\left(-\frac{t^2}{\tau_t^2}\right)\right|,\text{где}$$

$g(t)$ - корреляционная функция ОКТ сигнала
τ_b - время корреляции для Броуновского движения
τ_t - время корреляции для потокового движения

[1] Ivan Popov, Weatherbee A. S., Vitkin A.I. // Journal of Biomedical Optics. 2014. Vol. 19(12), 127004

Выводы

- Методом численного моделирования получены последовательности ОКТ сканов для различных типов движения рассеивателей, моделирующих эритроциты.

- Найдены аналитические аппроксимации для временной зависимости корреляционной функции на основе моделируемых сканов для простейших видов движений эритроцитов в сосуде.

- Продемонстрировано согласование полученных результатов с известными частными случаями, что подтверждает корректность предложенного метода моделирования.

- Численно исследовано вращательное движение эритроцитов, для которых получены асимптотики при малых и средних временах. Выявлен не рассматривавшийся ранее закон спадания корреляционной функции при Броуновском вращении эритроцитов.

Спасибо за внимание!