

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРНОГО ЭХО- СИГНАЛА МЕТОДОМ МОНТЕ- КАРЛО

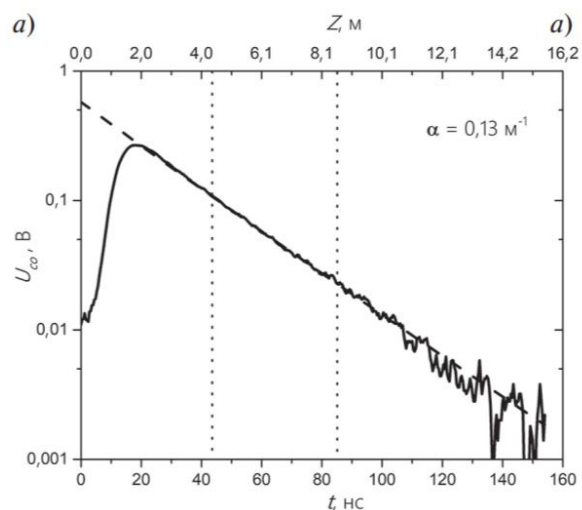
Московский физико-технический институт.
Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН.

28.05.2026

Сидорова М.Н.
Шеберстов С.В.
Глуховец Д.И.

Решаемая проблема

Для корректной интерпретации результатов зондирования возникает необходимость в численном моделировании данных. Наиболее эффективным является метод Монте-Карло моделирования.

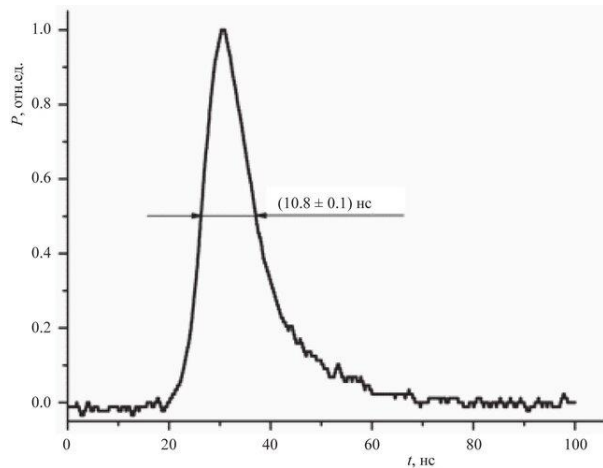


Глухов В. А.. Пример лидарного эхо-сигнала

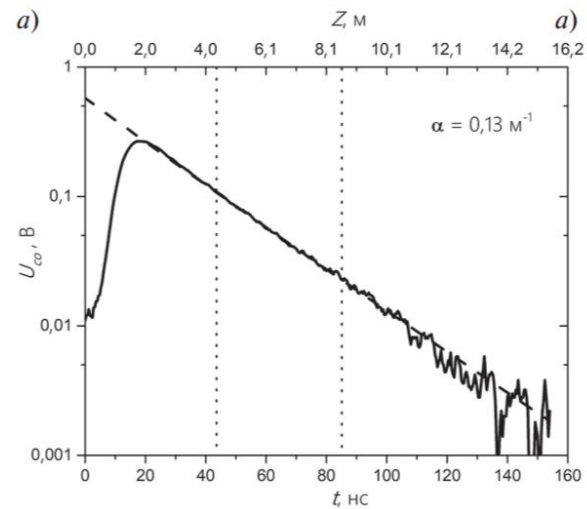


Лидарная установка

Морские лидары — это технология дистанционного зондирования, которая использует лазерные импульсы и принимает сигнал обратного рассеяния от водной толщи.



Глухов В. А.. Функция лазерного импульса



Глухов В. А.. Пример лидарного эхо-сигнала



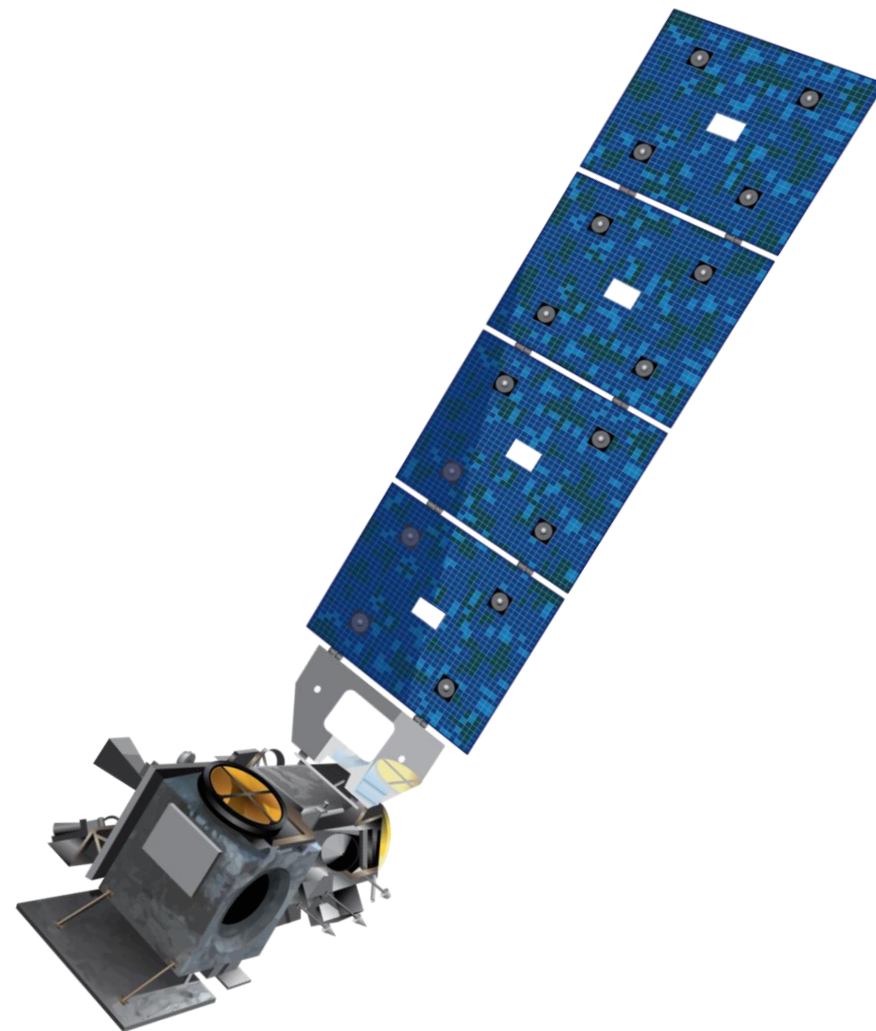
Спутниковые лидары

ACDL (Aerosol and Carbon Detection Lidar) — лидарная система, установленная на китайском спутнике Daqi-1 (DQ-1), который был запущен 16 апреля 2022 года. Это первый в мире космический лидар с высоким спектральным разрешением (HSRL).

ATLID (Atmospheric Lidar) — атмосферный лидар, установленный на борту спутника EarthCARE (Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer). Это совместный проект Европейского космического агентства (ESA) и Японского космического агентства (JAXA), запущенный в мае 2024 года.

ATLAS / ICESat-2

Миссия стартовала 15 сентября 2018 года. На борту аппарата находится единственный инструмент — лазерная сканирующая система ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System).



Характеристики лидара ПЛД1



532 нм

ДЛИНА ВОЛНЫ



7 нс

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ
ИМПУЛЬСА



1 Гц

ЧАСТОТА
ЗОНДИРОВАНИЯ



5 мрад

РАСХОДИМОСТЬ
ПУЧКА



10 см

ДИАМЕТР
ВХОДНОГО
ОБЪЕКТИВА

Цели и задачи

- Ознакомиться с законами, описывающими распространение фотонов в рассеивающей среде
- Построить модель, имитирующую распространение фотона в водной толще
- Сгенерировать лидарный эхо-сигнал методом Монте-Карло
- Провести сравнение модельного сигнала с измеренным в натуральных условиях
- Построить зависимости, позволяющие предугадывать показатель ослабления жидкости по виду лидарного эхо-сигнала

Вероятностный подход

Отражение от поверхности

Рассеяние/поглощение в водной толще

Угол рассеяния

Длина свободного пробега

Вероятностный подход

Отражение от поверхности

Коэффициент диффузного отражения
Френеля

Рассеяние/поглощение в водной толще

$$R = 0.5 \left(\left(\frac{\operatorname{tg}(\theta_i - \theta_t)}{\operatorname{tg}(\theta_i + \theta_t)} \right)^2 + \left(\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right)^2 \right)$$

Угол рассеяния

Длина свободного пробега

$$R \leq \mathit{rand}$$

Вероятностный подход

Отражение от поверхности

Рассеяние/поглощение в водной толще

Угол рассеяния

Длина свободного пробега

Вероятность выживания фотона:

$$\omega = \frac{b}{c}$$

$$\omega \leqslant \mathit{rand}$$

Вероятностный подход

Отражение от поверхности

Рассеяние/поглощение в водной толще

Угол рассеяния

Длина свободного пробега

Азимутальный угол:

$$\psi = 2\pi \cdot rand$$

Плотность вероятности рассеяния по
зенитному углу:

$$p(\cos(\gamma)) d(\cos(\gamma)) = 2\pi \cdot \beta(\cos(\gamma)) d(\cos(\gamma))$$

Функция распределения:

$$P(\cos(\gamma)) = 2\pi \int_0^{\cos(\gamma)} \beta(\cos(\gamma')) d(\cos(\gamma'))$$

Выражение для зенитного угла:

$$P = rand \longrightarrow \gamma$$

Вероятностный подход

Отражение от поверхности

Рассеяние/поглощение в водной толще

Угол рассеяния

Длина свободного пробега

Закон Бугера

$$I = I_0 \cdot e^{-cl}$$

Вероятность поглощения на участке $d\tau$:

$$p(\tau)d\tau = e^{-\tau}d\tau$$

Функция распределения:

$$P(\tau) = \int_0^{\tau} p(\tau')d\tau' = 1 - e^{-\tau}$$

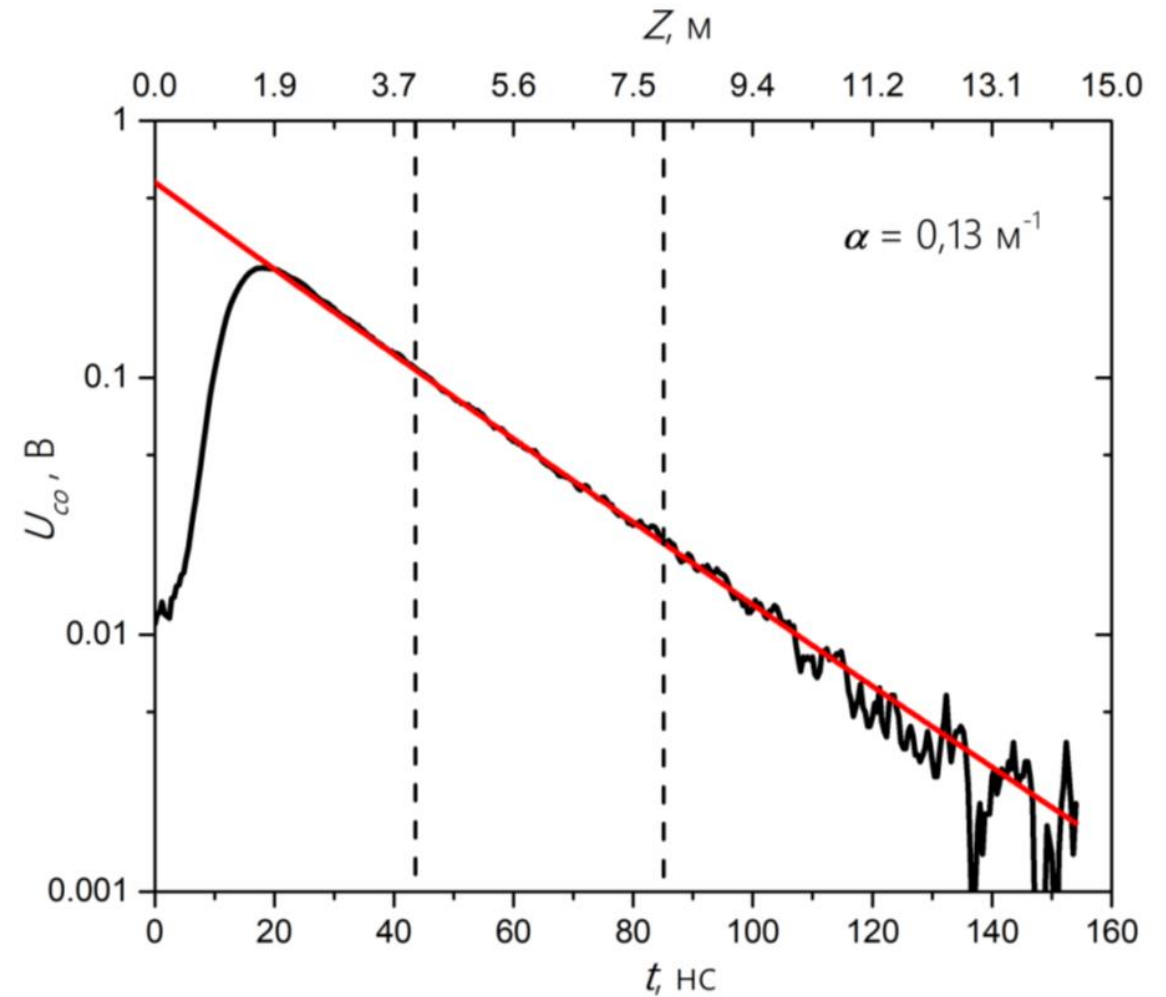
$$P = rand$$

Выражение для длины свободного пробега:

$$l = -\frac{1}{c} \ln(1 - rand) = -\frac{1}{c} \ln(rand)$$

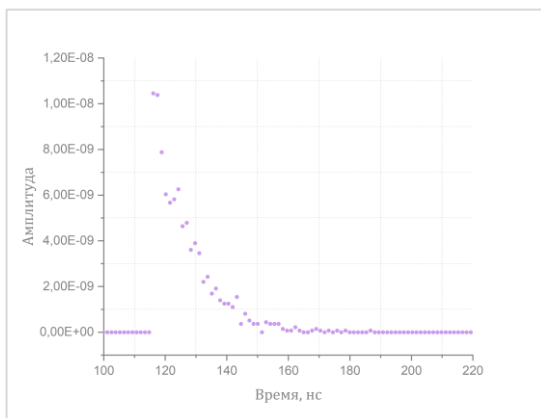
Лидарное уравнение

$$P\left(t = \frac{2Z}{c_w}\right) = \frac{c_w W_0 A T_0 (1-r)^2}{2(nH + Z)^2} \beta'(\pi, Z) \exp\left[-2 \int_0^Z \alpha(Z') dZ'\right]$$

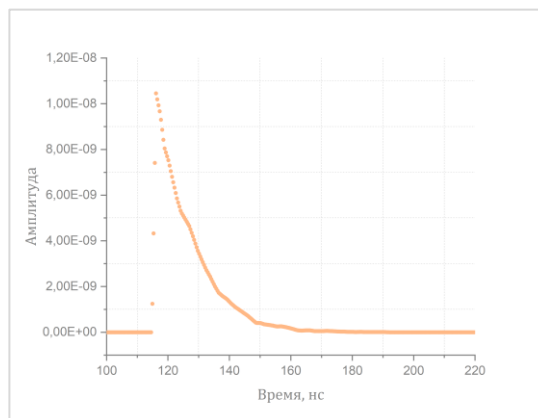


Обработка результатов

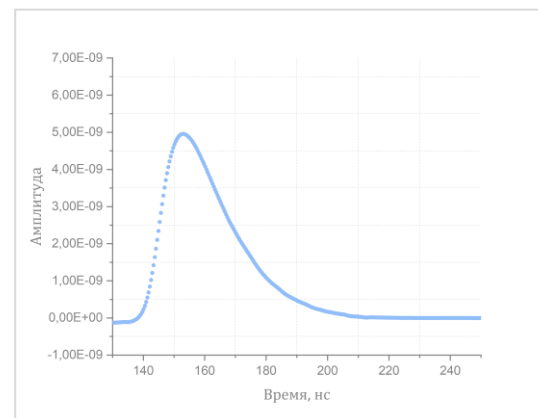
Генерация эхо-сигнала на основе заданных параметров (a , b , β , геометрия лидара)



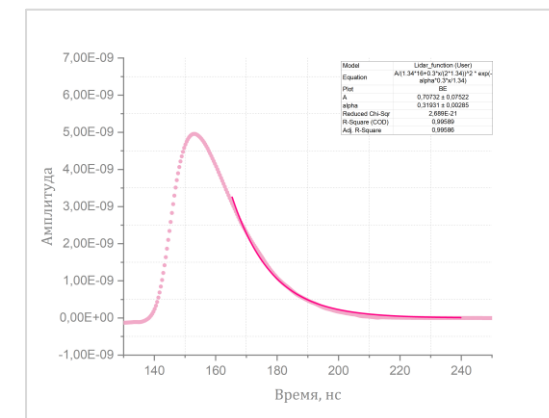
Интерполяция и сглаживание данных



Конволюция с функцией импульса



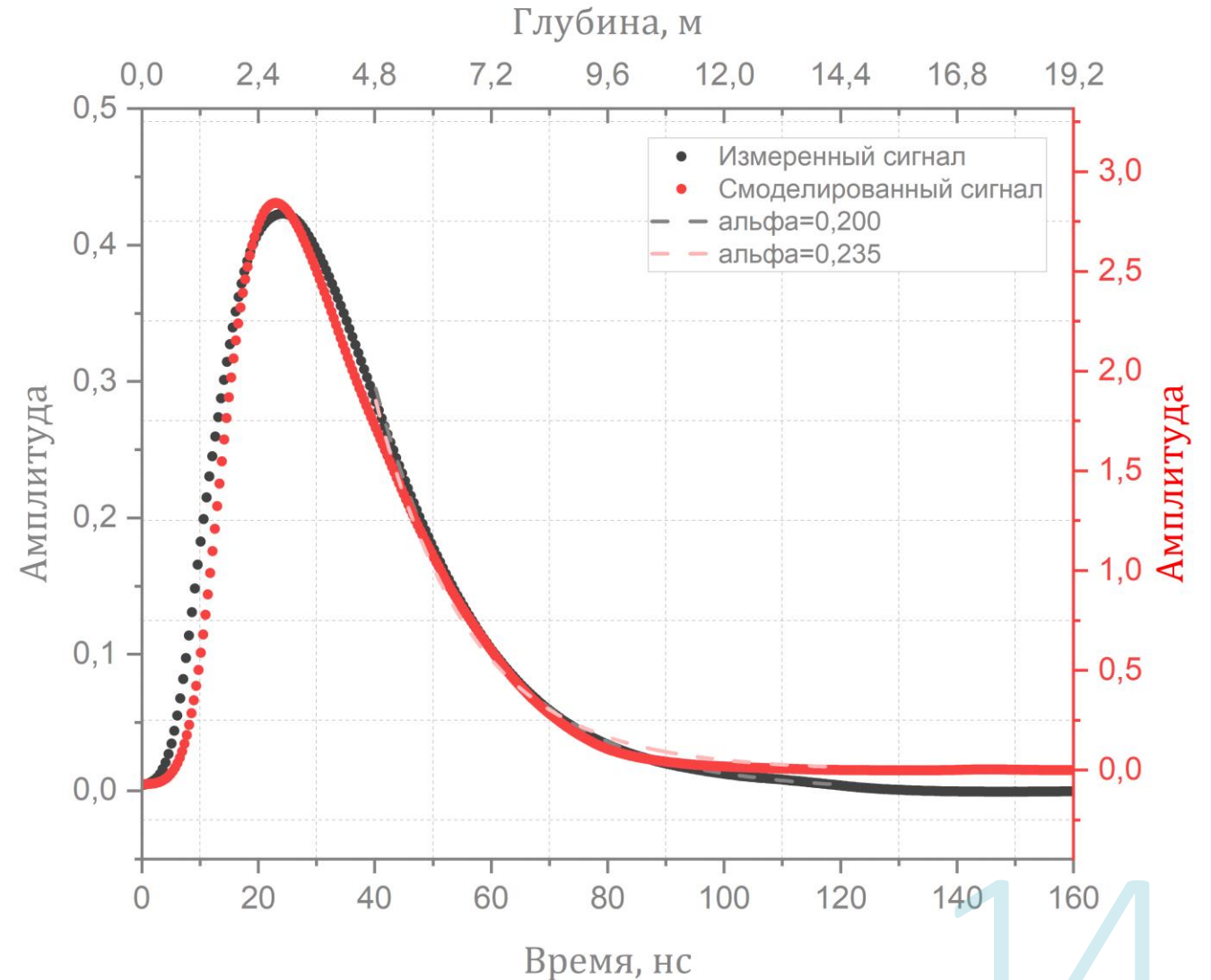
Аппроксимация лидарной функцией, определение α



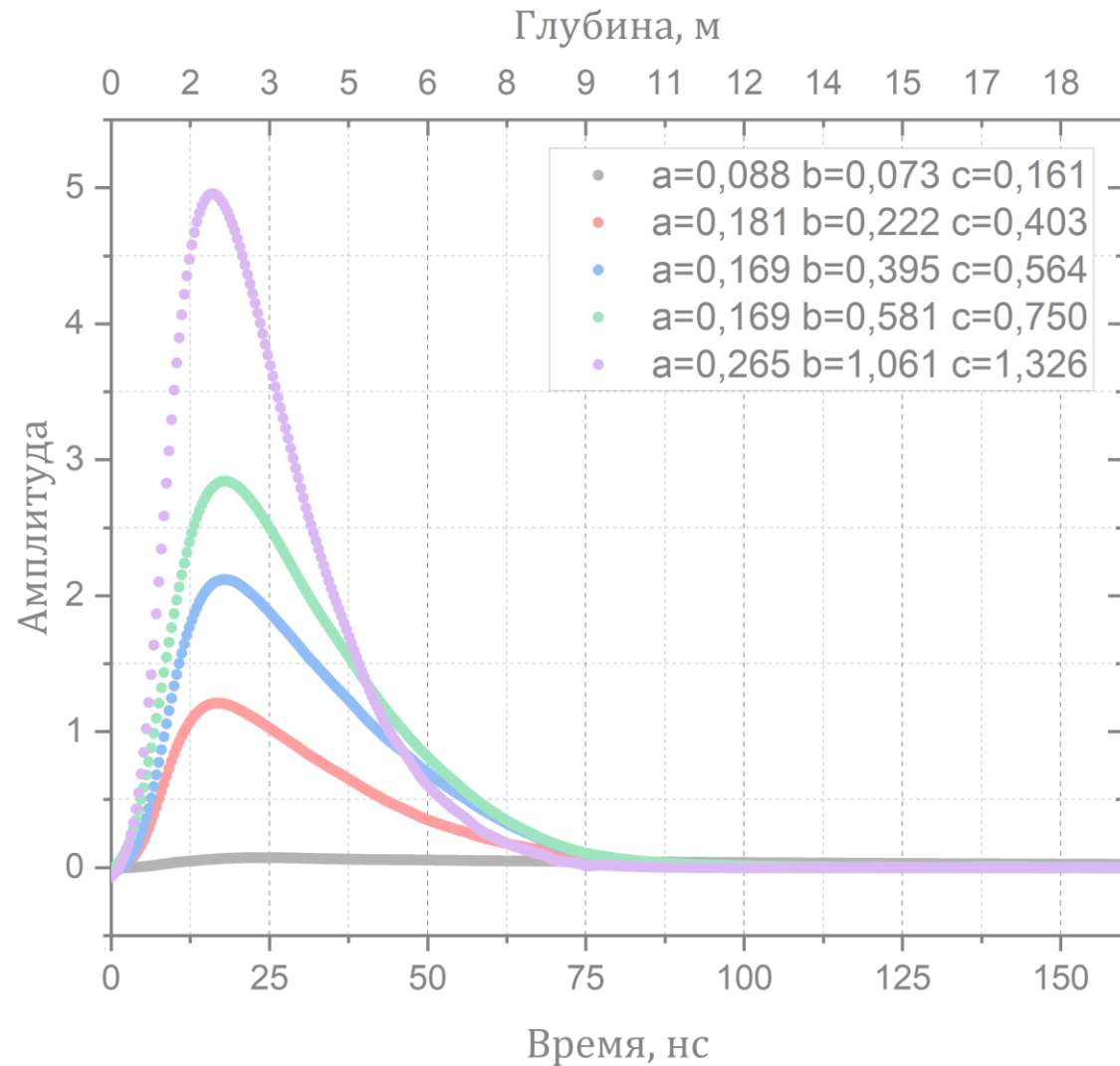
Пример обработки результатов моделирования

Результаты моделирования

Аппроксимация лидарной функции производилась в диапазоне 40 – 120 нс.

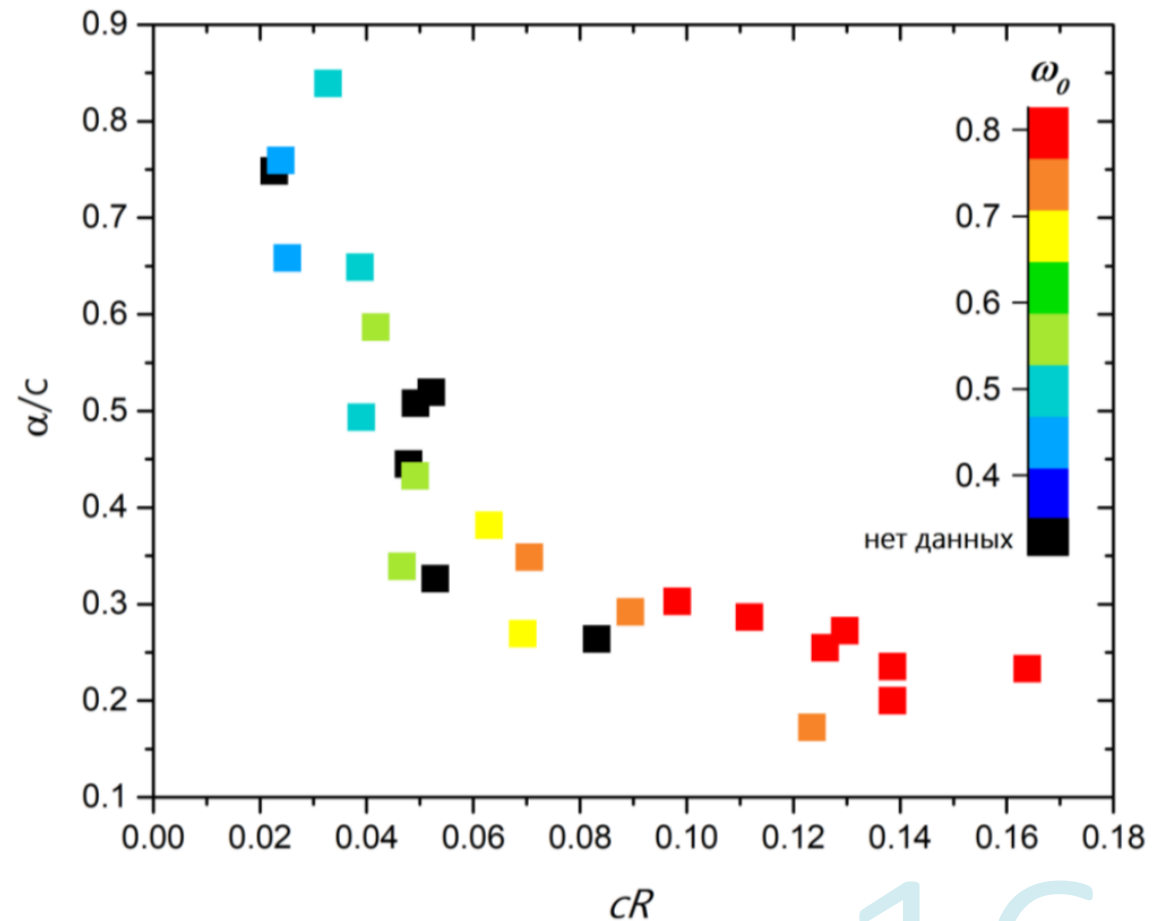
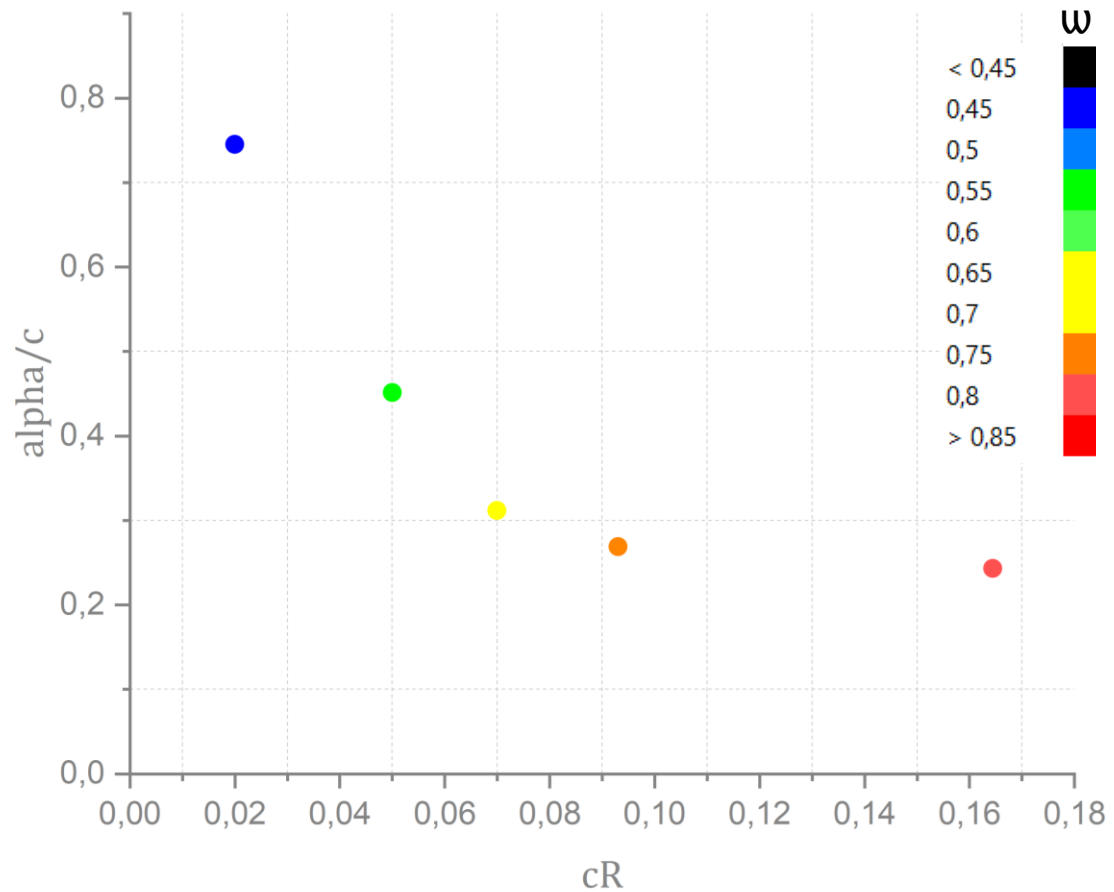


Результаты моделирования

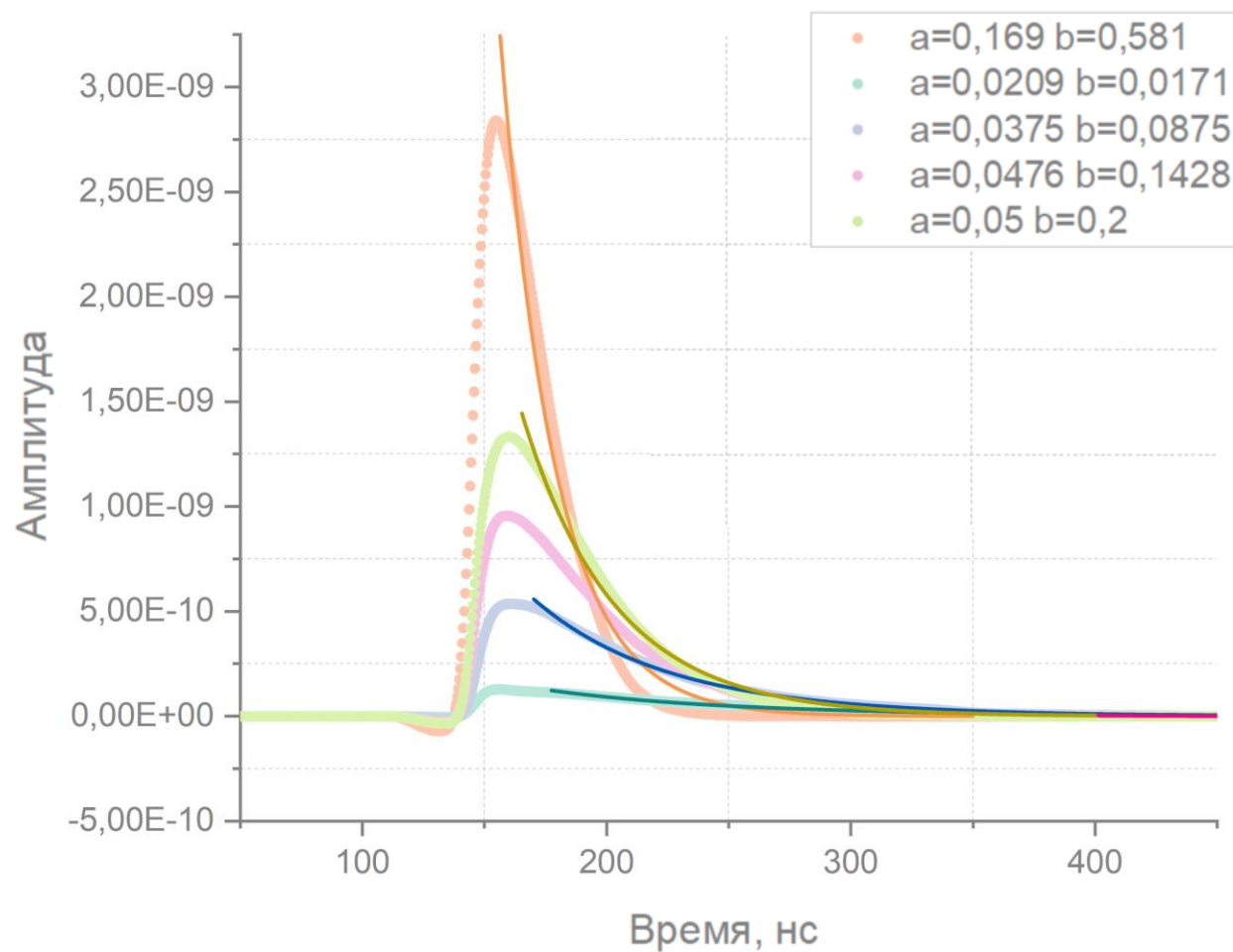


a 1/м	b 1/м	c 1/м	ω	α 1/м
0,088	0,073	0,161	0,450	0,016
0,181	0,222	0,403	0,550	0,168
0,169	0,395	0,565	0,700	0,182
0,169	0,581	0,750	0,770	0,218
0,265	1,061	1,327	0,800	0,291

Результаты моделирования

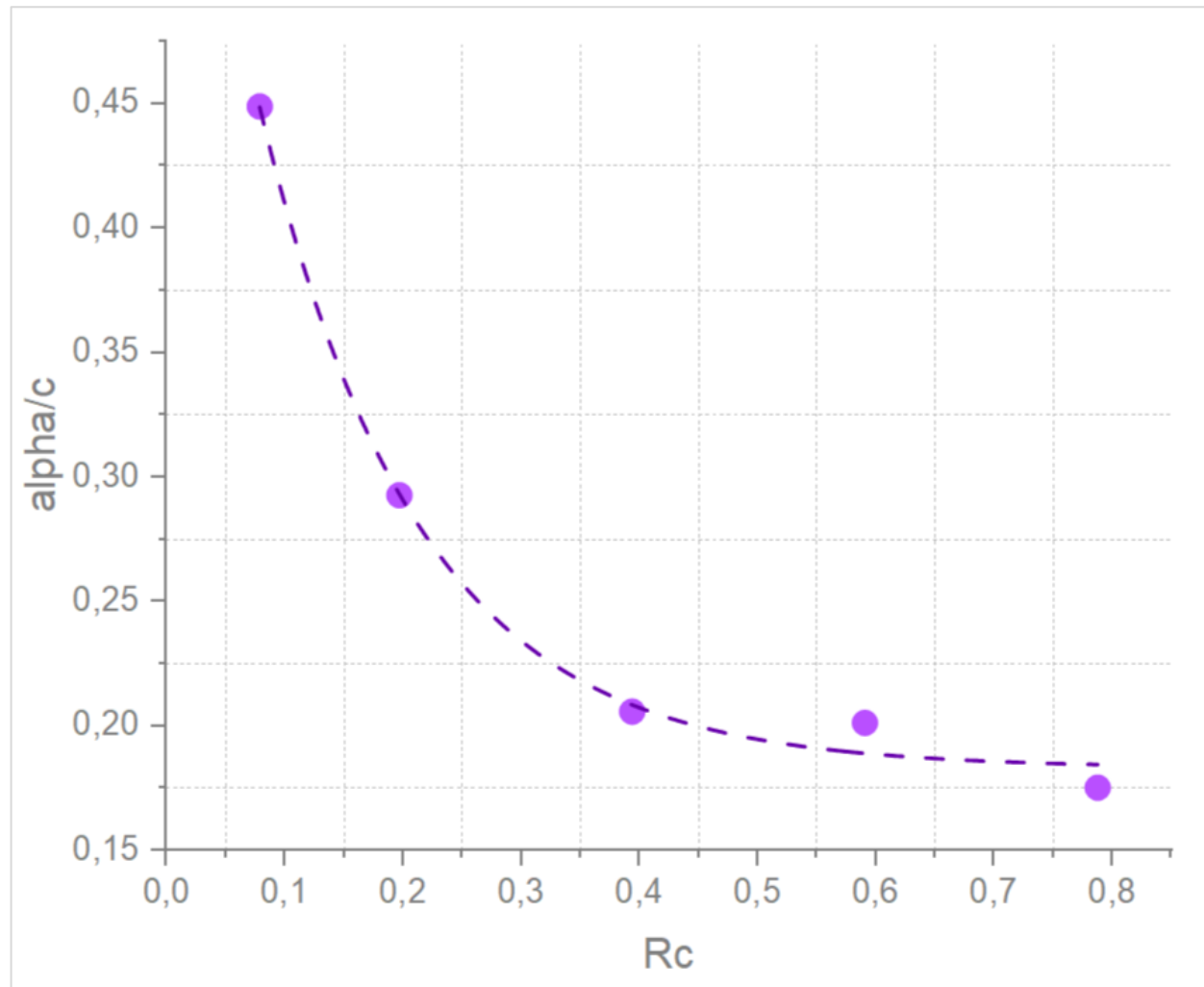


Результаты моделирования



a 1/м	b 1/м	c 1/м	
0,034	0,116	0,150	x0,2
0,085	0,291	0,375	x0,5
0,169	0,581	0,750	x1
0,254	0,872	1,125	x1,5
0,338	1,162	1,500	x2

Результаты моделирования



Планы на будущее

Учет стратификации

Учет поверхностного волнения

Учет поляризации света

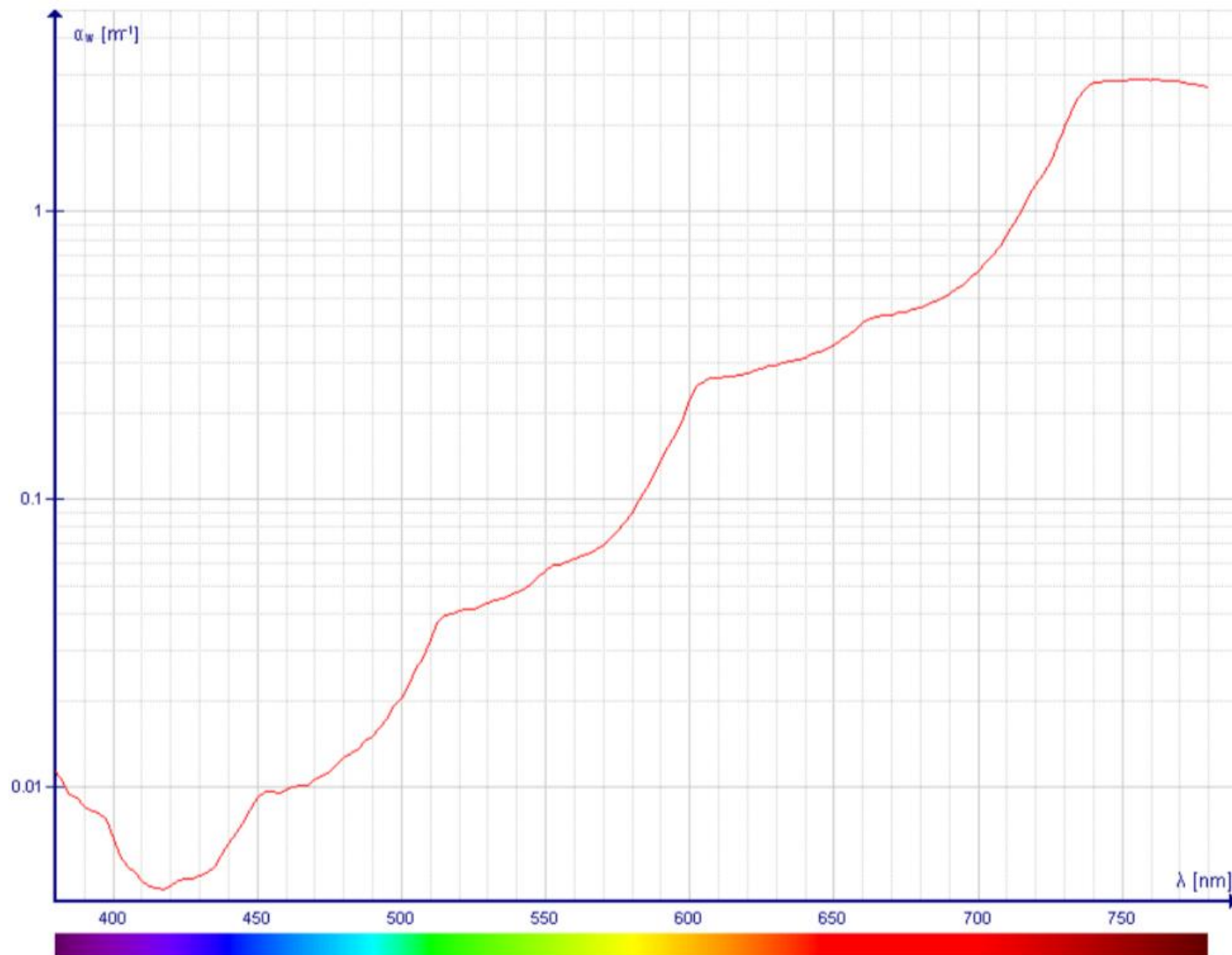
Спасибо за внимание!

Ссылки на литературу

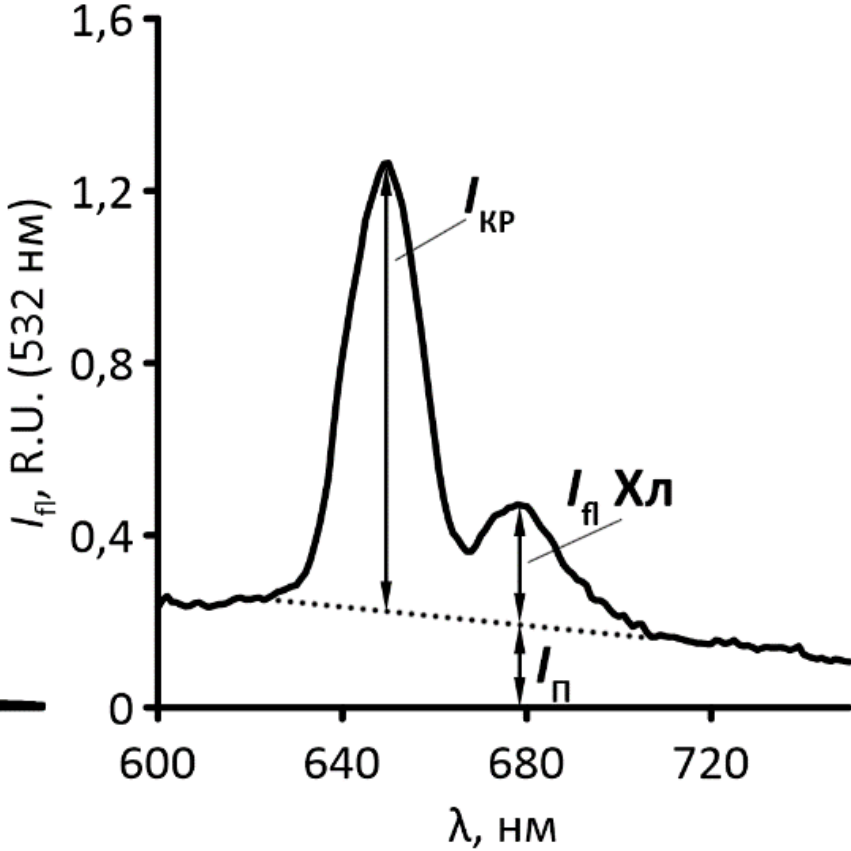
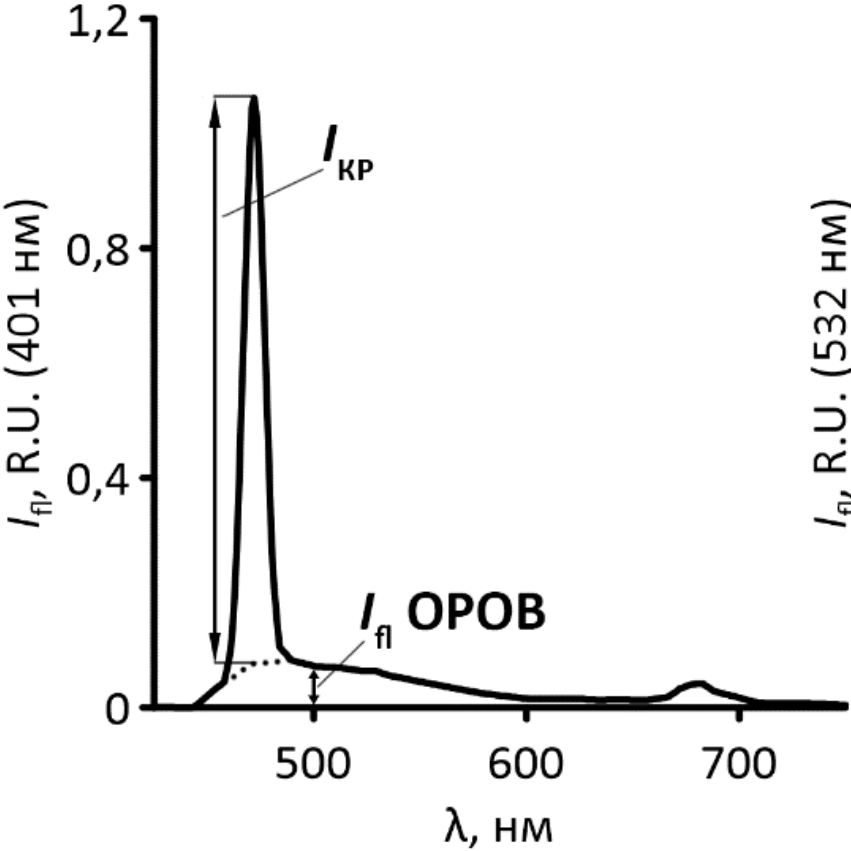
- Глухов В. А. Гольдин Ю. А., Родионов М. А. Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2017. Т. 10, № 2.
- Glukhov V. A., Goldin Yu. A., Glitko O. V., Aglova E. A., Rodionov M. A. The Use of Polarization Lidar for Registering the Horizontal Spatial Distribution of Seawater Beam Attenuation Coefficient // *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, V. 37, Suppl. 1, pp. S162–S168.
- Глуховец Д. И. Метод Монте-Карло для расчета характеристик световых полей в морской воде // *Океанологические исследования*, 2024. Т. 52, № 3, С. 5–20.
- Leathers R. A., Downes T., Davis O. C., Mobley D. C. Monte Carlo Radiative Transfer Simulations for Ocean Optics: A Practical Guide // *Naval Research Laboratory*, 2004.
- Gordon H. R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering // *Applied Optics* 21(16):2996-3001

Спектр поглощения ЧИСТОЙ ВОДЫ

Меньше всего вода
поглощает в синем
диапазоне.



Спектры неупругого рассеяния для разных длин волн возбуждения



Обоснование метода Монте- Карло

Уравнение переноса излучения

- Связывает первичные и вторичные оптические характеристики
- Дает теоретическую основу для дистанционного зондирования
- Решается численно или с использованием приближений

$$\frac{d\mathcal{L}}{de} = -c\mathcal{L} + \frac{b}{4\pi} \int \mathcal{L}(\theta', \psi') \cdot P(\theta, \theta') \cdot d\Omega'$$

Точные аналитические решения

Затруднительно использовать для вытянутых индикатрис из-за необходимости брать большое число членов в разложении индикатрисы по полиномам Лежандра

Метод сферических гармоник

Угловая зависимость яркости аппроксимируется рядом по сферическим функциям. Затруднительно использовать для вытянутых индикатрис из-за необходимости брать большое L

Метод дискретных ординат (DISORT)

Угловая зависимость яркости аппроксимируется по дискретному набору углов, интегральный член вычисляется с помощью некоторой квадратурной формулы. Полученная система линейных уравнений решается итерационным методом, последовательно учитывающим кратность рассеяния

Обоснование метода Монте- Карло

Уравнение переноса излучения

Преимущества – относительная простота и возможность учета:

1. Резкой анизотропии рассеяния
2. Стратификации
3. Волнения на поверхности
4. Поляризации

Недостатки – вычислительная трудность

$$\frac{d\mathcal{L}}{de} = -c\mathcal{L} + \frac{b}{4\pi} \int \mathcal{L}(\theta', \psi') \cdot P(\theta, \theta') \cdot d\Omega'$$