



Электронно-фотонные вычислительные системы для обработки больших объемов данных

Линник Дмитрий Михайлович

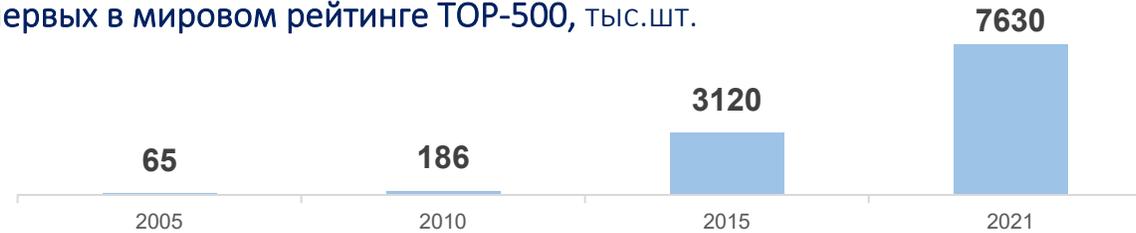
РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

✓ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ УСЛОЖНЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СУПЕР-ЭВМ



Динамика роста кол-ва процессоров супер-ЭВМ, первых в мировом рейтинге TOP-500, тыс.шт.



✓ СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СУПЕР-ЭВМ С ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ



Высокопроизводительные вычисления



Обработка видеоданных



Нейронные сети и машинное обучение



Нейроморфные системы и т.д.

✓ ПЕРЕХОД НА НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОПРОЦЕССОРОВ ДЛЯ СУПЕР-ЭВМ (2-5 НМ)

✓ ОГРАНИЧЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫХОДА НА ЗАРУБЕЖНЫЕ ФАБРИКИ ИЗ-ЗА СУЩЕСТВЕННЫХ САНКЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

АКТУАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА:

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА И НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НОВЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Одним из перспективных путей значительного повышения производительности отечественных вычислительных машин является применение фотонных вычислителей, в основе функционирования которых лежат эффекты взаимодействия когерентных систем световых волн, порождаемых лазерным излучением.

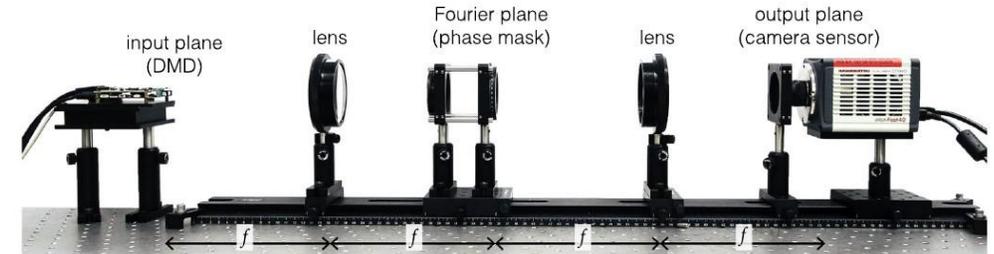
По сравнению с используемыми ЭВМ с универсальными процессорами и графическими ускорителями ведущих зарубежных фирм IBM, Intel, AMD, NVIDIA (базируются на технологических нормах 3-7 нм) специализированные ФВС могут обеспечить существенное ускорение решения определённых классов задач при значительном повышении энергоэффективности.

На основе подобных сопроцессоров возможно создание гибридных электронно-фотонных вычислительных систем для обработки больших объемов данных.

АНАЛОГОВЫЕ ФОТОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛИ

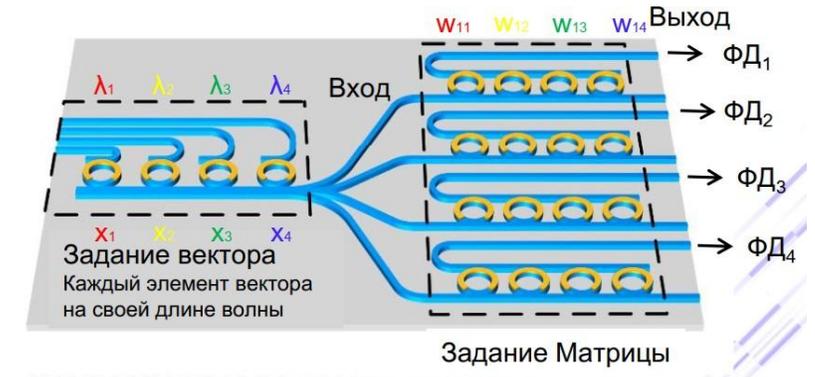
1. Метод «свободного» распространения света

R. A. Athale and W. C. Collins, "Optical matrix–matrix multiplier based on outer product decomposition," *Appl. Opt.* vol. 21, pp. 2089-2090, 1982. <https://doi.org/10.1364/ao.21.002089>



2. Метод с применением микрокольцевых резонаторов

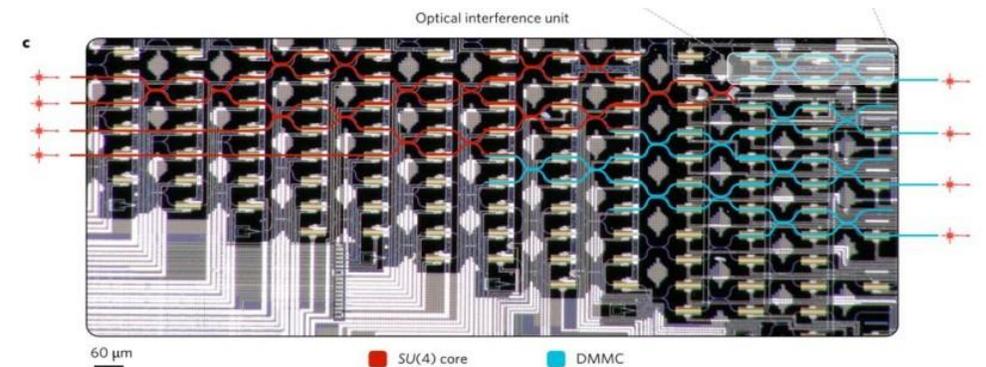
Tait, A.N.; de Lima, T.F.; Zhou, E.; Wu, A.X.; Nahmias, M.A.; Shastri, B.J.; Prucnal, P.R. "Neuromorphic photonic networks using silicon photonic weight banks". *Sci. Rep.*, 7, p 7430 (2017)



3. Метод с применением интерферометров Маха – Цендера

Michael Reck, Anton Zeilinger, Herbert J. Bernstein, and Philip Bertani "Experimental realization of any discrete unitary operator" *Phys. Rev. Lett.* 73, 58 (1994) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.58>

Deep learning with coherent nanophotonic circuits
Shen Y., Harris N.C., Skirlo S., Prabhu M., Baehr-Jones T., Hochberg M., Sun X., Zhao S., Larochelle H., Englund D., Soljacic M.
Nature Photonics, 2017, 11(7), сmp. 441–446



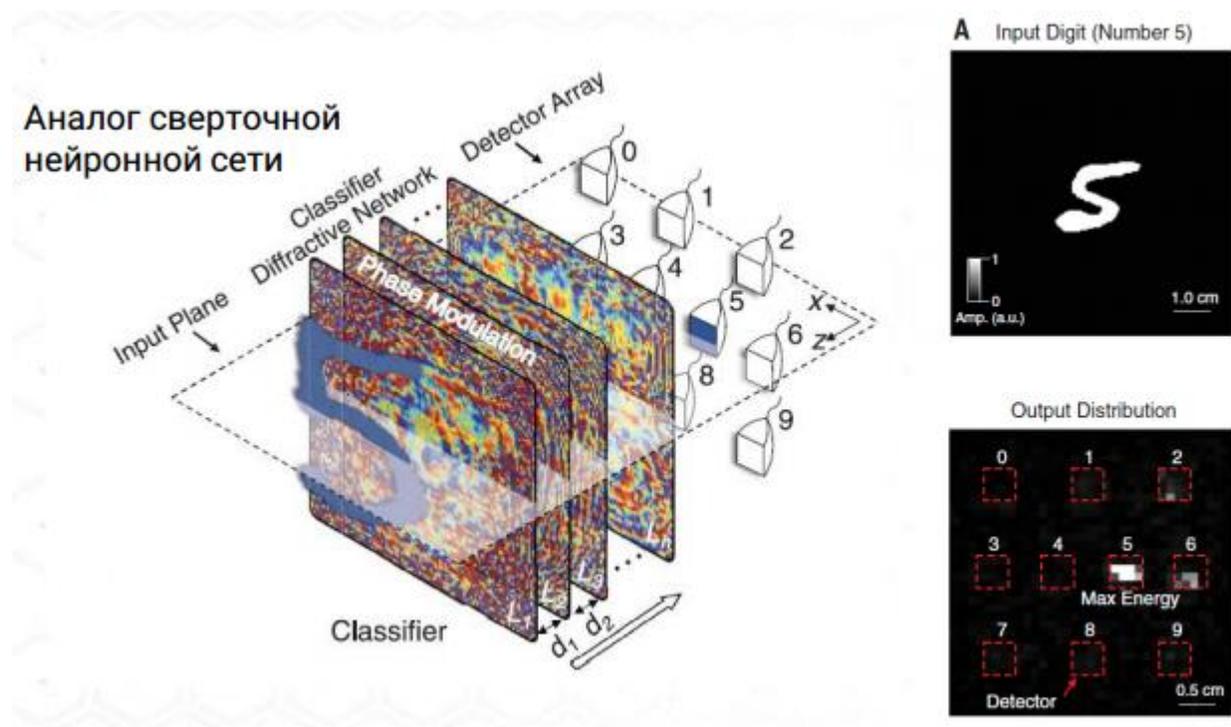
ДИФРАКЦИОННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Аппаратная реализация нейросетевых алгоритмов с помощью оптических дифракционных схем. Наиболее широкое применение на текущий момент нашло в области компьютерного зрения.

D²NN (Deep Diffractive Neural Network) – глубокая нейронная сеть на основе дифракции для классификации и распознавания образов

Распространение волн в свободном пространстве математически описывается дифракционным интегралом Кирхгофа, который представляет собой операцию свертки оптического поля с обученным ядром.

Процесс свертки всей матрицы происходит со скоростью света

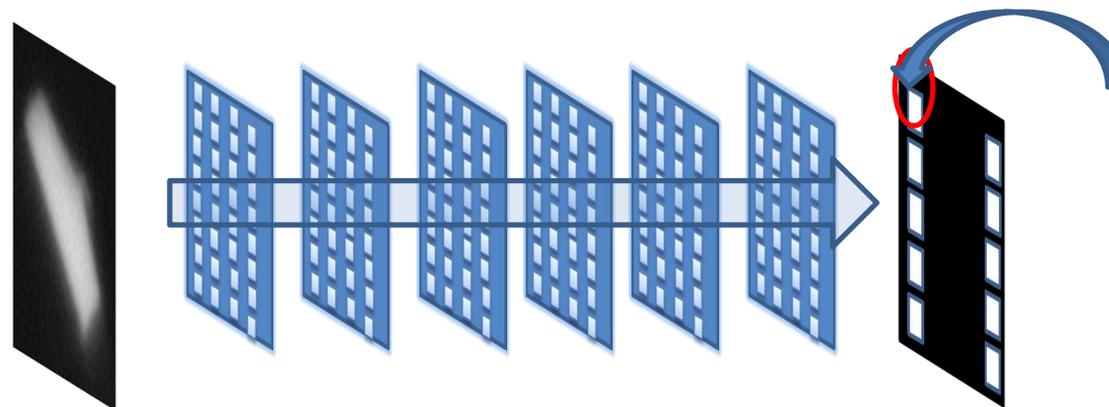


X. Lin, et al., "All-optical machine learning using diffractive deep neural networks," vol. 361, pp. 1004-1008, 2018
<https://doi.org/10.1126/science.aat8084>

ДИФРАКЦИОННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ

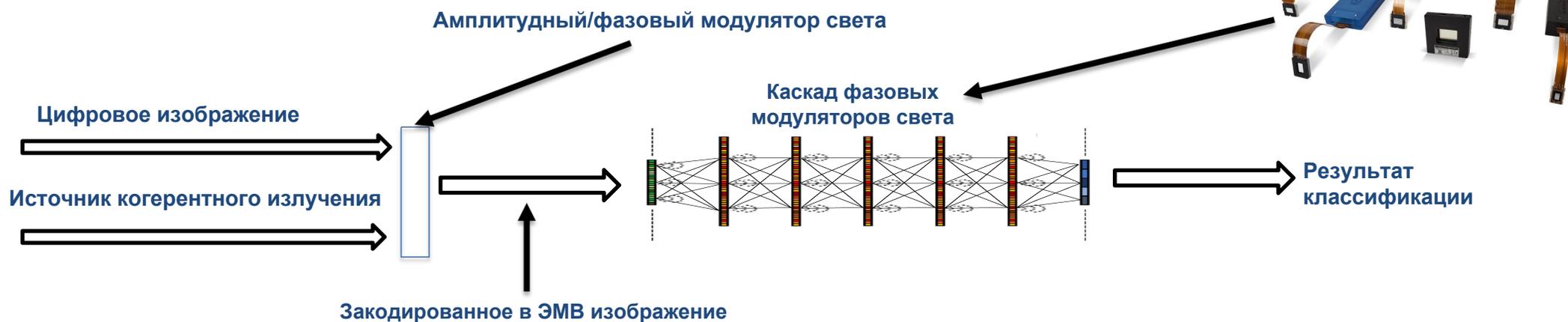
В основе работы дифракционной нейронной сети (ДНС) лежит идея о выполнении «вычислений» с использованием волновых свойств света путём управляемого формирования интерференционного поля.

Управление формированием интерференционной картины осуществляется путём фазовой модуляции фронта набегающей электромагнитной волны, несущей в себе пространственное изображение анализируемого объекта.

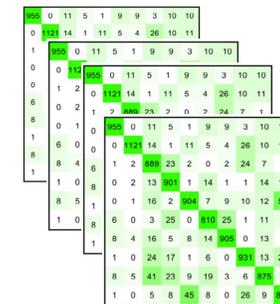
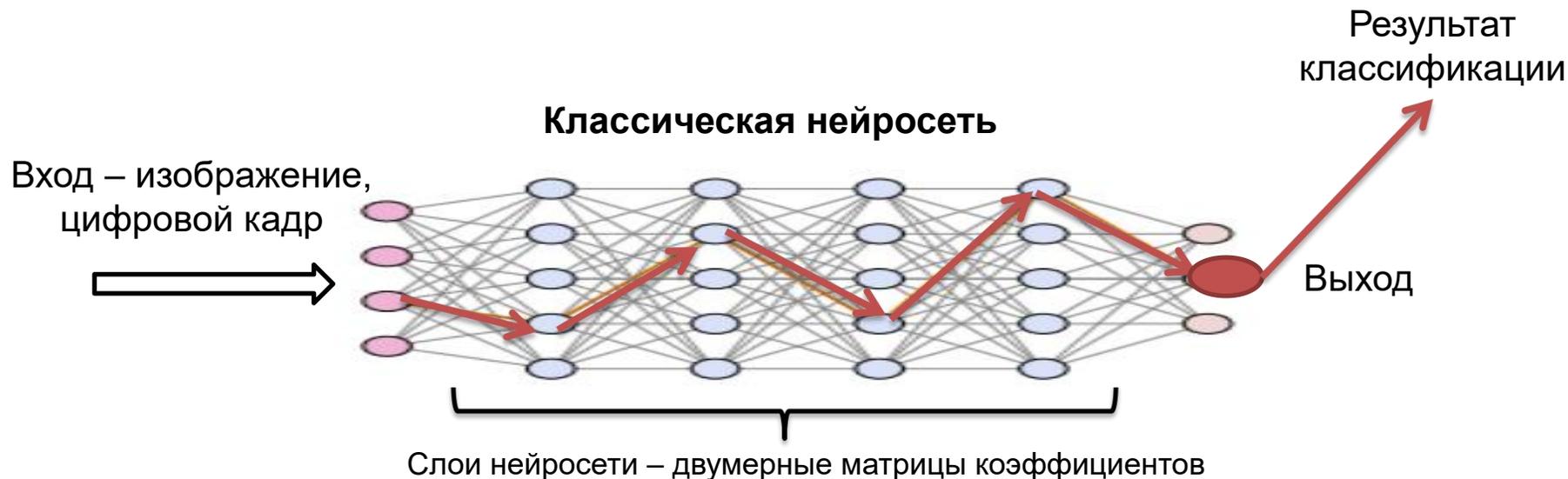


Результатом работы оптической схемы, реализующей ДНС, является формирование максимума освещенности одного из нескольких участков выходной плоскости, каждый из которых соотносится с определённым классом объекта.

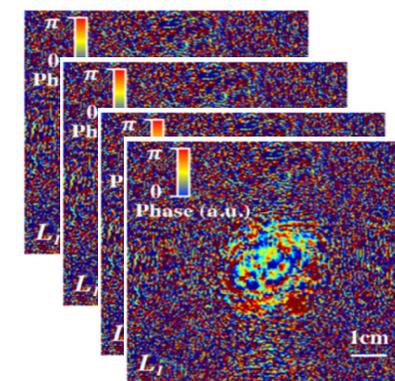
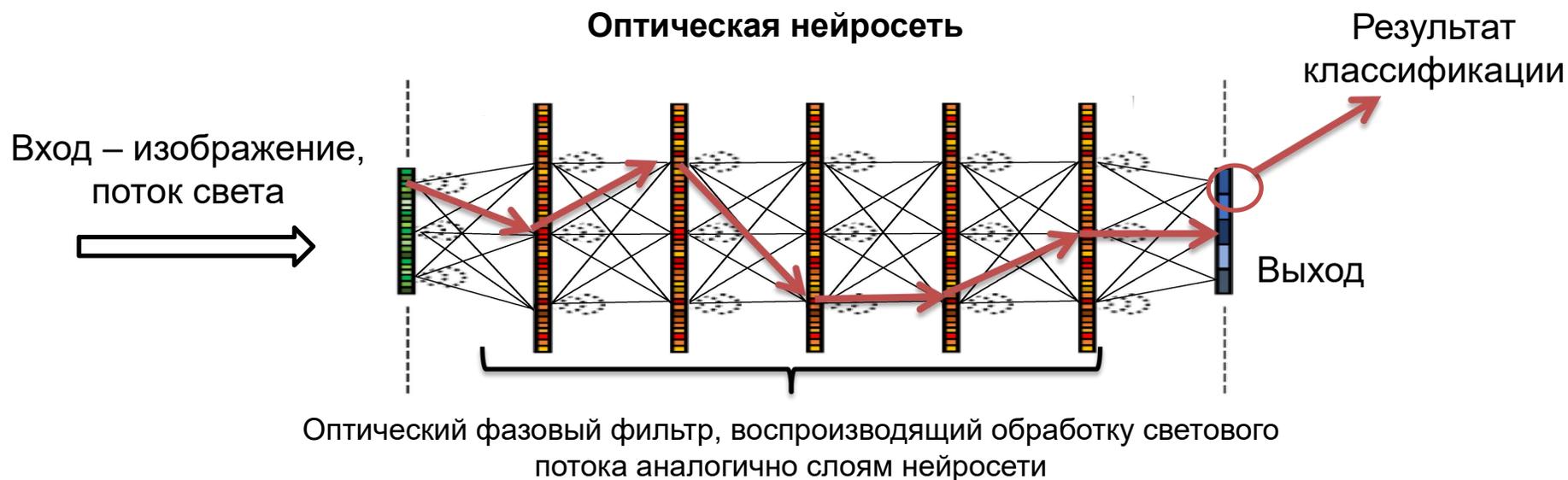
Распространение электромагнитной волны, несущей изображение объекта, через пространственные фазовые модуляторы



СРАВНЕНИЕ ИНС И ДНС

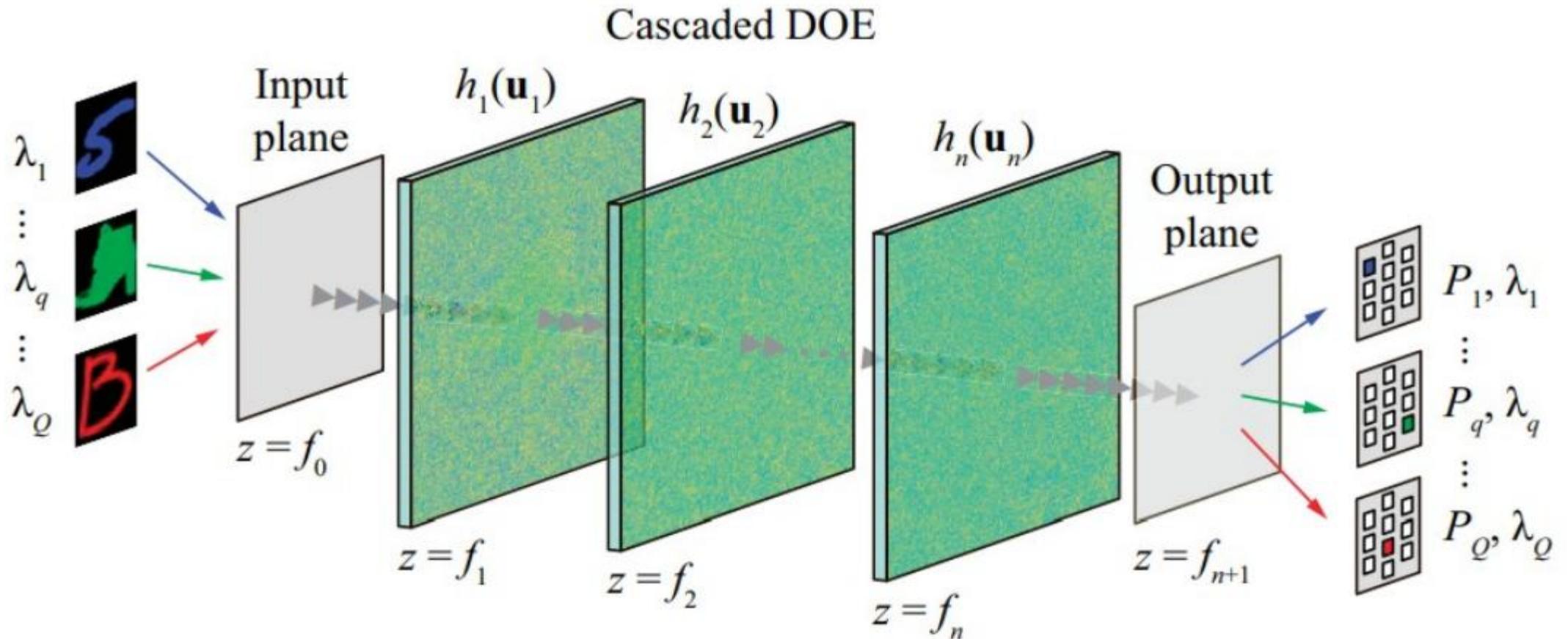


Матрица весовых коэффициентов



Фазовое представление весовых коэффициентов для когерентной волны

Параллельная обработка данных с использованием нескольких длин волн



Motz, Georgy A., et al. "Design of diffractive neural networks solving different classification problems at different wavelengths." arXiv preprint arXiv:2407.16486 (2024).

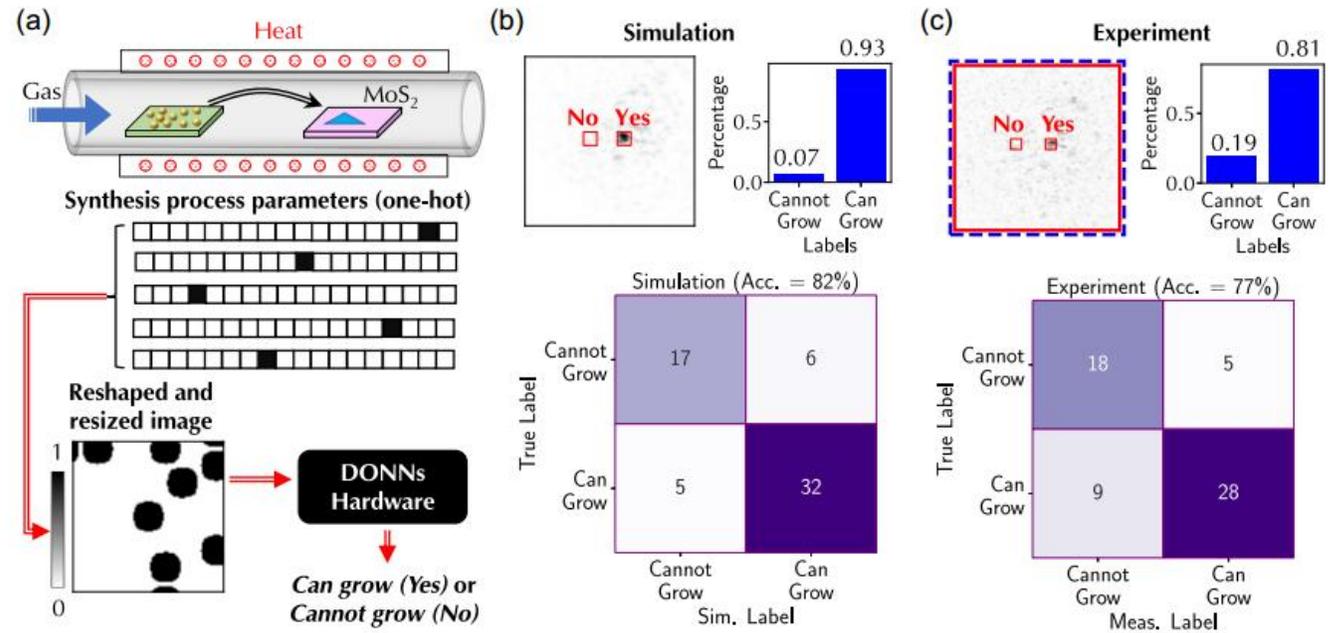
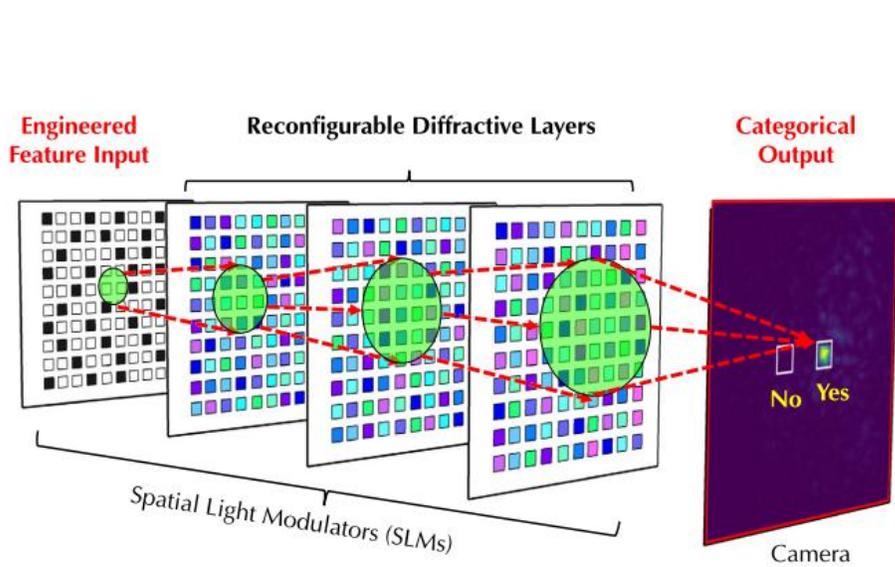


Figure 2. 2D quantum materials synthesis. a) Schematics of the CVD synthesis of MoS₂ monolayer flakes and the one-hot feature engineering of categorical input process parameters. The reshaped and resized images can be processed in the DONNs system to predict whether MoS₂ can be grown or not given process parameters. b) Simulation and c) experimental camera output images, intensity distributions in two camera regions, and confusion matrices.

Результаты моделирования подтверждают возможность использования ДНС для управления процессом синтеза MoS₂, и полученная точность 82% сопоставима с точностью, полученной с использованием стандартных моделей ML, таких как многослойный перцептрон (MLP) и дерево решений XGBoost.

ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА АФС



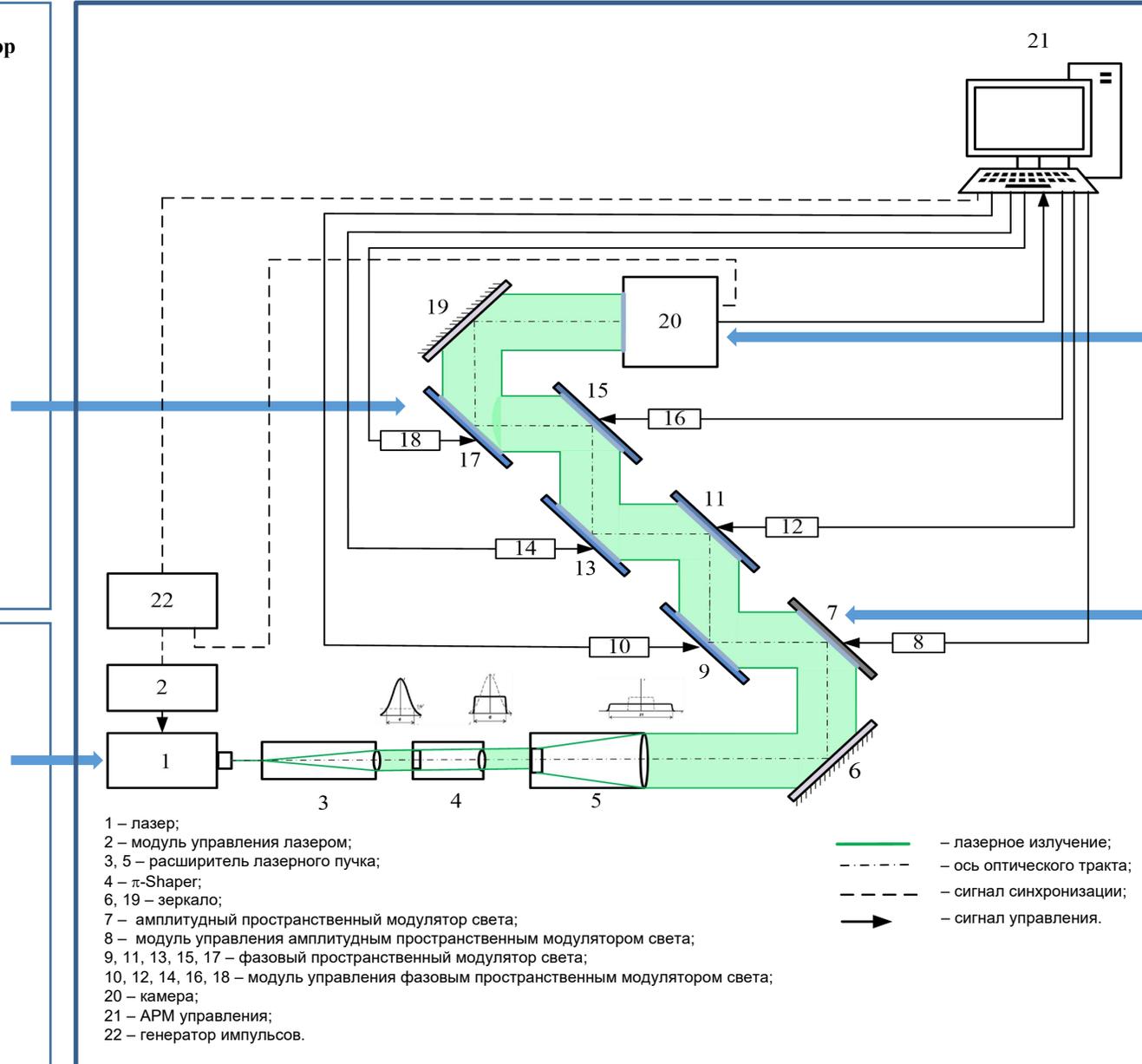
РФАЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

ЖК пространственный фазовый модулятор с блоком управления (Поз. 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18)

Параметр	Значение
Разрешение	1920x1080
Размер пикселя	4,5 мкм
Длина волны	420-700 нм
Частота	420 Hz
Глубина цвета	8 бит
Интерфейс	DP/HDMI

Лазер (Поз. 1, 2)

Параметр	Значение
Длина волны	532,316 нм
Вых. мощность	214,4 мВт
Диаметр пучка	0,881 (1/e ²)



Камера (Поз. 20)

Параметр	Значение
Разрешение	5120x5120
Размер пикселя	2,5 мкм
Длина волны	420-700 нм
Частота	от 150 Hz
Глубина цвета	10-12 бит
Интерфейс	PCI Express

Амплитудный пространственный модулятор (с блоком управления) (Поз. 7, 8)

Параметр	Значение
Разрешение	2048x1200
Размер пикселя	5,4 мкм
Длина волны	420-700 нм
Частота	16100Hz/1100H z
Глубина цвета	1-16 бит
Интерфейс	DP/HDMI

АФС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРОГРАММ

Распознавание паттернов на входных изображениях размером 2028x2048 (8 bit) пикселей со скоростью 180 кадров в секунду

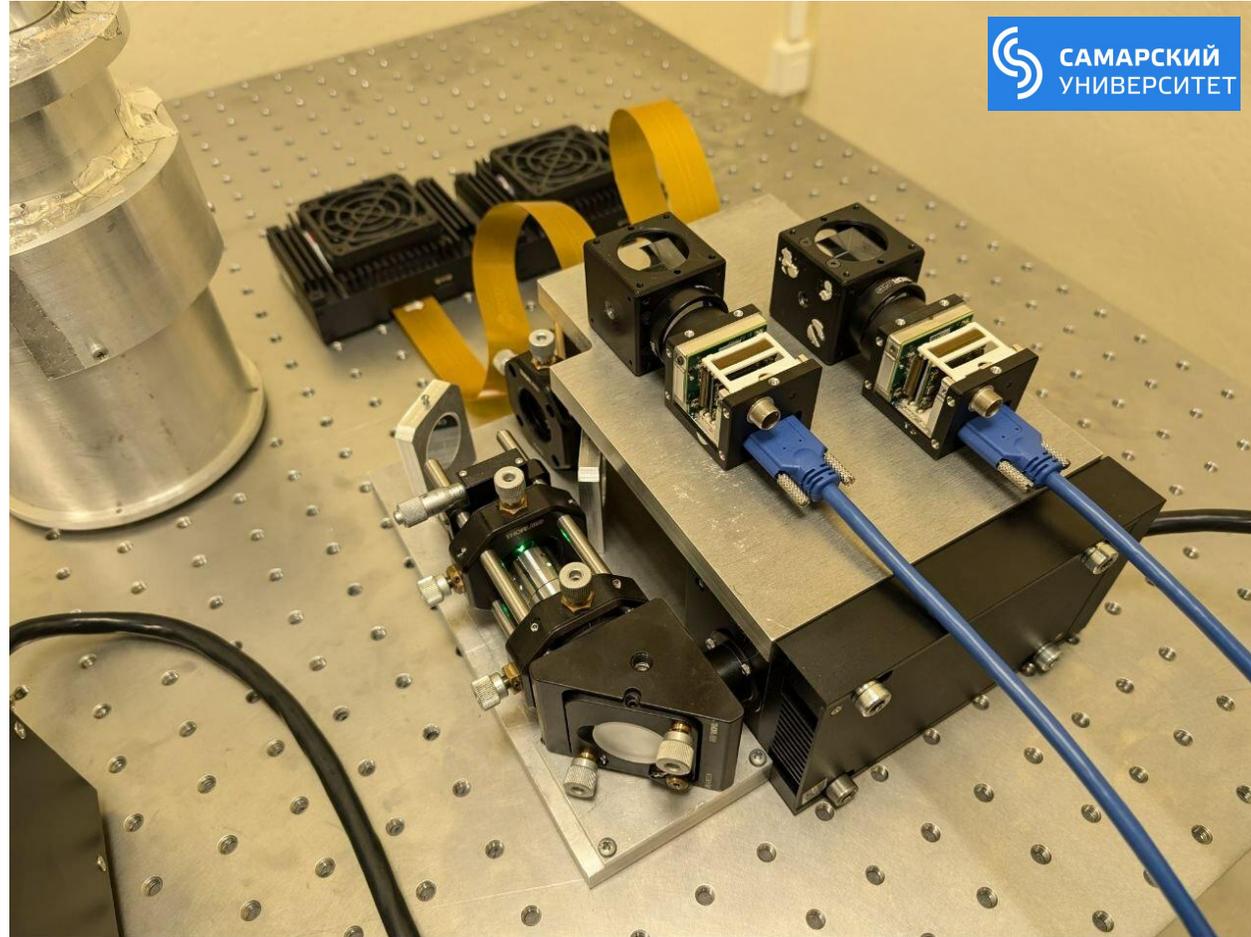
TDP 38 W



РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ



Вид промежуточной оптической схемы сверху



Оптическая схема в корпусе 200x200 мм

<https://nauka.tass.ru/nauka/21722515>

Электронная вычислительная система

Процессор
универсальный



Коммуникация



Прикладное
программное
обеспечение

Системное
программное
обеспечение

Компоненты

Универсальные
серверы



Вычислительные модули

Шкаф



энергообеспечение и
поддержка климата



Инженерная
подсистема



Супер-ЭВМ

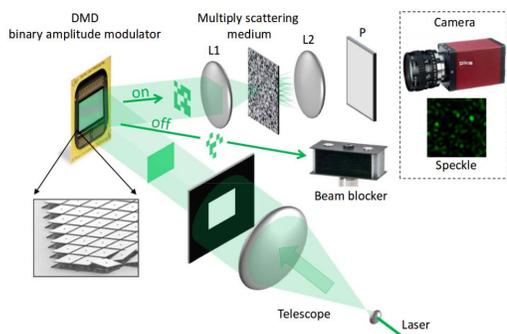
Электронно-фотонная вычислительная система



ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭФВС

№ п/п	Параметры	ЭФВС
1	Теоретическая пиковая производительность обработки данных, ГБ/с	60
2	Количество универсальных процессоров, шт	20
3	Тип сопроцессора	АФС
4	Количество сопроцессоров, шт	20
5	Площадь, м.кв. (без учета зоны обслуживания)	7
7	Энергопотребление, кВт	до 60

ПЕРВАЯ УСПЕШНАЯ ПОПЫТКА ИНТЕГРАЦИИ АФС В НРС (ФРАНЦИЯ)



Декабрь 2017

Создан демонстрационный образец АФС на основе принципа свободного распространения света для решения задачи линейной классификации, позволяющий при минимальных затратах энергии выполнять работу по извлечению существенных признаков из сырых данных в потоковом режиме со скоростью на порядок превышающей GPU.



Апрель 2020

Доведен до уровня промышленного образца. Пиковая производительность 1.5 PetaOPS, 30W TDP, 2U форм-фактор. Компания Lighton предоставила онлайн-доступ к оптическим вычислениям через облачную инфраструктуру Light On, для доказательства готовности вычислительных фотонных технологий к работе в центрах обработки данных.



Декабрь 2021

Интегрирован в европейский суперкомпьютер Jean Zay (36.85 Pflop/s). Доступ к АФС предоставлен избранным исследователям новой архитектуры.

<https://www.lighton.ai/lighton-blogs/lighton-photonic-coprocessor-integrated-into-european-ai-supercomputer>

1. С использованием архитектуры дифракционных нейронных сетей фотонные (оптические) вычислительные устройства имеют все шансы перейти из категории узкоспециализированных вычислителей в категорию многофункциональных устройств, способных решать широкий круг прикладных задач.
2. Аналогично квантовым вычислительным системам, фотонные вычислительные системы не смогут полностью заменить классические электронные ВС, но на целом ряде практических задач вполне способны продемонстрировать своё превосходство, как в плане производительности, так и в плане энергопотребления.
3. Создание ключевых компонент и подсистем ЭФВС, а также организация их серийного производства **возможна** на уже существующей технологической базе Российской Федерации.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ