План первой главы:

1. Анализ современного состояния проблемы обработки ОКТ-изображений сетчатки
   1. Необходимость анализа изображений ОКТ-изображений сетчатки
      1. ОКТ-изображение сетчатки (описать принцип работы ОКТ) (Написать о том, что оно позволяет исследовать структуры без вскрытия???)
      2. ЕСЛИ НЕ БУДЕТ ХВТАТЬ СТРАНИЦ, ТО МОЖНО НАПИСАТЬ ПРО СЛОИ СЕТЧАТКИ ОТДЕЛЬНО.
      3. Биомаркеры патологий на ОКТ-изображении сетчатки
   2. Обзор существующих методов обработки ОКТ изображений
   3. Недостатки рассмотренных методов обработки изображений
   4. Алгоритм
   5. Постановки цели и задачи
2. Постановка цели и задачи

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ ОКТ-ИЗОБРАЖЕНИ СЕТЧАТКИ

## Необходимость анализа ОКТ-изображений сетчатки

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), заболевания сетчатки, включая возрастную макулярную дегенерацию (ВМД), диабетическую ретинопатию и глаукому, входят в число основных причин ухудшения зрения и слепоты во всём мире. Согласно последнему глобальному обзору, более 250 миллионов человек страдают от нарушений зрения, значительная доля которых обусловлена патологиями сетчатки [1].

Одним из наиболее информативных методов диагностики заболеваний сетчатки является оптическая когерентная томография (ОКТ), обеспечивающая высокое пространственное разрешение и визуализацию тонких морфологических изменений. Однако интерпретация ОКТ-изображений требует высокой квалификации специалистов, а также значительных временных ресурсов. В условиях роста численности пожилого населения и распространённости метаболических заболеваний (например, сахарного диабета) увеличивается потребность в регулярном офтальмологическом мониторинге, что существенно повышает нагрузку на систему здравоохранения.

Разработка методов автоматизированного анализа ОКТ-изображений с использованием алгоритмов машинного и глубокого обучения позволяет значительно повысить эффективность диагностики. Такие подходы обеспечивают возможность быстрого и объективного анализа, снижают вероятность врачебной ошибки, а также создают предпосылки для масштабируемых скрининговых программ, включая телемедицинские решения в удалённых регионах. В совокупности эти факторы определяют актуальность исследований, направленных на повышение точности и надёжности автоматических систем анализа ОКТ-данных.

### ОКТ-изображение сетчатки

Оптическая когерентная томография (ОКТ) – метод неинвазивного исследования внутренней микроструктуры объектов, основанный на различной способности их внутренних элементов поглощать и отражать световое излучение [1]. Работа ОКТ основана на принципе интерференции световых волн: световой луч, отраженный исследуемым объектом, сравнивается с опорным световым лучом, результирующая разность фаз между двумя световыми потокам используется для формирования изображения микроструктуры исследуемого объекта. Данные, получаемые в результате исследования, принято называть сканами. Различают *A*-, *B*- и *C*-сканы:

1. *A-*скан показывает степень отражения оптического излучения по глубине объекта в одной точке поверхности. На рисунке 1 пример *A-*скана.
2. *В*-сканом называется совокупность *A-*сканов, полученных в точках, расположенных вдоль одной линии в латеральной плоскости исследуемого объекта. Результатом является изображение, в котором интенсивность пикселей в каждом столбце пропорциональная отражению зондирующего излучения по глубине. Результирующее изображение может интерпретироваться, как изображение поперечного сечения исследуемого объекта. На рисунке 2 изображен пример *B-*скана.
3. *C-*сканом называется горизонтальное сечение трёхмерного облака точке, полученного из совокупности *B-*сканов. На рисунке 3 представлен пример C‑скана.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Рисунок 1 –Пример *A-*скана | Рисунок 2 – Пример *B‑*скана | Рисунок 3 – Пример *C‑*скана |

Применение оптической когерентной томографии позволило визуализировать микроструктуру сетчатки. На рисунке 4 представлено изображение здоровой сетчатки с выделенными гистологическими слоями (улучшить изображение).

Рис. Микроанатомия ретинальных слоёв по данным спектральной оптической когерентной томографии высокого разрешения (по Staurenghi G., et al, 2014; Шпак А.А., 2015)







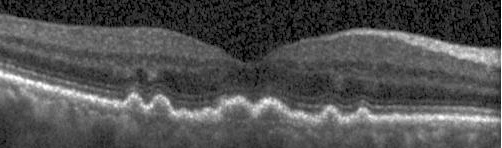
Рисунок 4 – Пример изображения сетчатки, получаемого при помощи оптической когерентной томографии

Различные морфологические изменения микроструктуры сетчатки могут являться ранними предикторами развития различных офтальмологических заболеваний.

### Морфологические изменения сетчатки, как предикторы различных офтальмологических заболеваний

Различные структурные морфологические образования могут являться предикторами офтальмологических заболеваний. Рассмотрим несколько примеров:

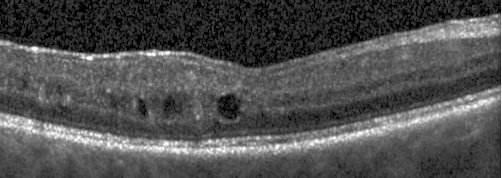
* Друзы – это внеклеточные отложения, которые накапливаются между пигментным эпителием сетчатки (ПЭС) и мембраной Бруха. Друзы являются одним из ранних признаков развития возрастной макулярной дегенерации (ВМД) [2, 3]. На рисунке 5 представлен пример друз, видимых на ОКТ-изображении сетчатки.



Друзы

Рисунок 5 – Пример друз на ОКТ-изображении сетчатки глаза

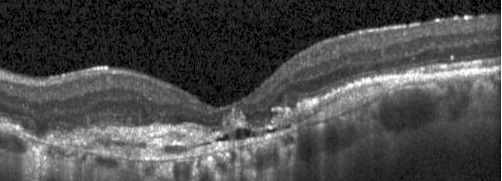
* Интераретианльные кисты – патологические полости, заполненные жидкость, образующиеся в нейроэпителиальном слое. Интераретианльные кисты являются одним из признаков развития ВМД или кистозного/диабетического отёков [4, 5]. На рисунке 6 представлен пример интераретианльных кист, видимых на ОКТ-изображении сетчатки.



Кисты

Рисунок 6 – Пример интераретианльных кист на ОКТ-изображении сетчатки

* Субретинальные гиперрефлективный материал (СГМ) – гиперрефлективные образования, образующиеся в нейроэпителиальном слое над пигментным эпителием. Субретинальные гиперрефлективный материал является предиктором таких заболеваний, как: ВМД, патологическая миопия (ПМ), полипоидальная хориоидальная васкулопатия (ПХВ) и центральная серозная хориоретинопатия (ЦСХ) [6, 7]. На рисунке 7 представлен пример субретинального гиперрефлективного материала, видимого на ОКТ-изображении сетчатки.



СГМ

Рисунок 7 – Пример субретинального гиперрефлективного материала на ОКТ-изображении сетчатки

По результатам анализа морфологических изменений сетчатки возможно с высокой долей достоверности классифицировать имеющиеся офтальмологические заболевания и оценивать вероятность их дальнейшего прогрессирования.

Кроме того, раннее выявление предикторов офтальмологических заболеваний позволяет вовремя назначить необходимо лечение и остановить или замедлить развитие заболевания.

## Обзор существующих методов анализа ОКТ-изображений

### Ручной анализ

Ручным анализом называют метод обработки ОКТ-изображения, выполняемый врачом офтальмологом, при котором выделение патологий и выявления их характеристик выполняются врачом. В некоторых случаях, к анализируемому изображению может быть применена предварительная обработка (например, усиление контрастности, фильтрация шума).

### Алгоритмические методы

Алгоритмические методы позволяют проводить сегментацию ОКТ-изображения по слоям, анализ структур и выделения патологий:

* Градиентный анализ – метод анализа, основанный на вычислении изменений интенсивности пикселей в изображениях для выделения границ между различными структурами. Градиентный анализ применяется для точной сегментации слоёв сетчатки.
* Морфологический анализ – группа методов обработки изображений, основанная на изменении формы объектов изображения с помощью операций расширения, сужения, открытия, закрытия. Морфологический анализ применяется для выделения патологических образований, таких как кисты, опухоли, области отслоения сетчатки или изменений в толщине слоя.
* Графовые модели – методы, основывающиеся на представлении изображений в виде графа, где пиксели или группы пикселей становятся узлами, а связи между ними – рёбрами. Графовые модели применяют для решения задач сегментации слоёв сетчатки, выделения патологий.

## Недостатки существующих методов анализа ОКТ-изображений

У рассмотренных ранее методов можно выделить некоторые общине недостатки:

1. Каждый из рассмотренных методов требует ручной валидации и, в некоторых случаях, сегментации неразмеченных участков врачом офтальмологом. Ручная сегментация и валидация являются трудоёмкими и длительными процессами, требующими внимания врача. Соответственно, результат анализа в большей степени зависит от квалифицированности и внимательности врача офтальмолога. Также, результат анализа субъективен, что, соответственно, может привести к неоднозначности получаемых выводов.
2. Алгоритмические методы плохо справляются с анализом сложных структур, неоднородных или сильно зашумленных данных – например, при анализе изображений с большими участками шума или структур с перекрывающими слоями могут возникать ошибки в сегментации объектов или снижение её точности.
3. Алгоритмические методы обладают ограниченной гибкостью и адаптивностью. Алгоритмические методы часто не могут адаптироваться к новым, нестандартным данными или патологическим изменениям, которые не учитывались при разработке алгоритма.
4. Многие алгоритмические методы требуют ручной подстройки параметров. Например, выбора пороговых значений при использовании градиентного метода или выбора структурных морфологических операций при использовании морфологического анализа.
5. Рассмотренные ранее методы не эффективны при обработке больших объёмов данных. Производительность ручных методов зависит от таких факторов, как: субъективная сложность анализируемого изображения, профессиональность врача офтальмолога, человеческий фактор. Производительность алгоритмических методов зависит от доступного вычислительного ресурса.
6. Алгоритмические методы, как правило, ориентированы на решение одной узкой задачи — например, сегментации границ слоёв или обнаружения кистозных образований. При необходимости комплексного анализа изображения использование таких методов требует последовательного применения множества отдельных алгоритмов, что значительно увеличивает время обработки и снижает общую эффективность подхода. Также, алгоритмические методы не учитывают контекст задачи и возможные зависимости между различными анализируемыми структурами.

## Нейросетевые алгоритмы

В настоящее время всё большую популярность набирают алгоритмы сегментации изображений с использование нейронных сетей. Использование нейронных сетей при анализе ОКТ-изображений сетчатки облегчает работу врача офтальмолога, позволяя автоматизировать задачи разметки ОКТ-изображений, прогнозирования диагноза и шансов развития болезни. Врач офтальмолог проводит валидацию результатов анализа изображения, вносит необходимые изменения, принимает взвешенное решения о результирующем диагнозе и назначает соответствующее лечение.

Google DeepMind совместно с Moorfields Eye Hospital в Великобритании разработали нейросетевую модель для сегментации ОКТ-изображения сетчатки, которая успешно прошла клиническую валидацию и применяется, как экспертная система поддержки офтальмологов при диагностике [8].

В таблице 1 представлены различные архитектуры моделей, обученных для решения задачи сегментации ОКТ-изображений сетчатки [9-12].

Таблица 1 – Результаты исследований решения задачи сегментации ОКТ-изображений сетчатки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Статья | Классифицируемые заболевания | Архитектура модели | Характеристики |
| Ganjee, Razieh, Mohsen Ebrahimi Moghaddam, and Ramin Nourinia. An unsupervised hierarchical approach for automatic intra-retinal cyst segmentation in spectral-domain optical coherence tomography images [9]. | ВМД, ДМО | Markov random filed (MRF) | Точность (Precision) – 0.85  Полнота (Recall) – 0.84  Коэффициент Dice – 0.78 |
| Rahil, Mohammad, B. N. Anoop, G. N. Girish, Abhishek R. Kothari, Shashidhar G. Koolagudi, and Jeny Rajan. A deep ensemble learning-based CNN architecture for multiclass retinal fluid segmentation in OCT images [10]. | ВМД, ДМО, ОВС | U-Net | Точность (Precision) – 0.80  Полнота (Recall) – 0.75  Коэффициент Dice – 0.70 |
| Ganjee, Razieh, Mohsen Ebrahimi Moghaddam, and Ramin Nourinia. A generalizable approach based on the U-Net model for automatic intraretinal cyst segmentation in SD-OCT images [11]. | ВМД, ДМО | U-Net (modified) | Точность (Precision) – 0.79  Полнота (Recall) – 0.84  Коэффициент Dice – 0.78 |
| George, N., Shine, L., Abraham, B. and Ramachandran, S., 2024. A two-stage CNN model for the classification and severity analysis of retinal and choroidal diseases in OCT images [12]. | ДМО | U-Net | Точность (Precision) – 0.95  Полнота (Recall) – 0.96  Коэффициент Dice – 0.91 |

Результаты исследований, приведенные в таблице 1, показывают, что алгоритмы сегментации на основе нейронных сетей способны решать задачу сегментации ОКТ-изображения. Исследования приводят статистические данные расчётных значений точности, полноты и коэффициента Dice, значения которых, во многих случая, превышают 80%, что говорит об отличной способности нейросетевых алгоритмов сегментировать требуемые участи изображения. Во многих случаю, результирующая модель способна выделать патологии, относящиеся к разным заболеваниям.

Однако, представленные модели, способны работать только с определенным перечнем офтальмологических заболевания в связи с ограниченностью открытых баз данных, используемых для их обучения. Модели способны выделять патологии, относящиеся к ВМД, ДМО и ОВС. Такие заболевания, как, например, ПХВ, ЦХВ, неполный разрыв маккулы не могут быть распознаны и сегментированы моделями, представленными выше по причине их отсутствия в открытых базах данных.

Также, хоть представленные модели показываю довольно хорошие результаты сегментации, однако их архитектуры уже устарели из чего можно вывести предположение о том, что новые архитектуры смогут лучше справляться с задачей сегментации ОКТ-изображений сетчатки.

## Постановка цели и задачи

Целью магистерской диссертации является разработка программно-алгоритмического комплекса, способного проводить классификацию патологических изображений сетчатки, полученных с помощью оптической когерентной томографии, их разметку и вероятностный вывод возможного офтальмологического заболевания.

Задачи:

1. Разработка структуры программно-алгоритмического комплекса.
2. Разработка алгоритмов обработки ОКТ изображений сетчатки.
3. Сравнения результатов работы новейших архитектур нейронных моделей и выбор наиболее подходящей архитектуры.
4. Разработка графического интерфейса для взаимодействия с программно-алгоритмическим комплексом
5. Экспериментальная апробация программно-алгоритмического комплекса.

Объектом исследования магистерской диссертации является программно-алгоритмический комплекс.

Предметом исследования магистерской диссертации является методическое, программно-алгоритмическое, информационное и метрологическое обеспечения.

Планируемые научные и практические результаты:

Планируемыми научными результатами магистерской диссертации являются: структура биотехнической системы, алгоритмы предобработки ОКТ-изображений, обученная модель нейронной сети, используемой для выделения патологий на ОКТ-изображениях.

Планируемым практическим результатом магистерской диссертации является: разрабатываемый программно-алгоритмический комплекс.