

# ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 615.47

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-12

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ МУКОПОЛИСАХАРИДОЗА 1 ТИПА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МРТ

**Е. В. Богданов**

Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского, Москва, Россия  
Evgeniy.bogdanov95@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1) является редким наследственным заболеванием лизосомного метаболизма, что приводит к накоплению гликозаминогликанов в тканях организма. Вследствие нейродегенеративных изменений у пациентов с МПС 1 наблюдаются когнитивные и моторные нарушения, которые требуют постоянного клинического мониторинга. Магнитно-резонансная томография (МРТ) является основным инструментом визуализации структурных изменений в головном мозге, однако традиционные методы анализа МРТ-данных обладают рядом ограничений, связанных с субъективной интерпретацией изображений и высокой трудоемкостью обработки данных. *Материалы и методы.* В настоящем исследовании предложен алгоритм автоматизированного анализа МРТ-данных, направленный на оценку динамики изменений структуры головного мозга у пациентов с МПС 1. Алгоритм включает несколько ключевых этапов: предобработку изображений, количественный анализ объемов серого и белого вещества, а также желудочков. Вычисление объемов мозговых структур осуществляется на основе сегментированных данных, после чего производится их сравнение с возрастными и половыми нормативами. Особое внимание в алгоритме уделено расчету отклонений объемов серого и белого вещества, а также желудочков мозга от референтных значений, что позволяет количественно оценить степень нейродегенеративных изменений. На основе этих данных осуществляется оценка динамики заболевания путем сравнения параметров на последовательных временных точках. Введенные критерии изменения объемов мозговых структур позволяют определить степень прогрессирования патологического процесса, а также спрогнозировать дальнейшее развитие заболевания на основе экстраполяции текущих трендов. *Результаты и выводы.* Реализация алгоритма проведена в программной среде MATLAB, что обеспечивает автоматизацию обработки изображений, повышение точности расчетов и удобство интерпретации результатов. Разработанный подход протестирован на клинических данных пациентов с установленным диагнозом МПС 1, что позволило подтвердить его эффективность в оценке динамических изменений структур головного мозга.

**Ключевые слова:** мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1), магнитно-резонансная томография, алгоритм анализа МРТ-данных, объемы серого и белого вещества, желудочки мозга, динамика изменений

**Для цитирования:** Богданов Е. В. Анализ динамики мукополисахаридоза 1 типа на основе данных МРТ // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 97–104. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-12

## ANALYSIS OF MUCOPOLYSACCHARIDOSIS TYPE 1 PROGRESSION BASED ON MRI DATA

**E.V. Bogdanov**

Russian Scientific Center of Surgery named after academician B.V. Petrovsky, Moscow, Russia  
Evgeniy.bogdanov95@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Mucopolysaccharidosis Type 1 (MPS 1) is a rare inherited lysosomal metabolism disorder that leads to the accumulation of glycosaminoglycans in body tissues. Due to neurodegenerative changes, patients with MPS

1 experience cognitive and motor impairments that require continuous clinical monitoring. Magnetic resonance imaging (MRI) is the primary tool for visualizing structural changes in the brain; however, traditional MRI data analysis methods have several limitations related to subjective image interpretation and the high complexity of data processing. *Materials and methods.* This study proposes an algorithm for automated MRI data analysis aimed at assessing the dynamics of brain structure changes in patients with MPS 1. The algorithm includes several key stages: image preprocessing, segmentation of brain structures, quantitative analysis of gray and white matter volumes, as well as ventricular structures. The calculation of brain structure volumes is performed based on segmented data, followed by comparison with age- and sex-specific normative values. A particular focus of the algorithm is the calculation of deviations in the volumes of gray and white matter, as well as brain ventricles, from reference values, which allows for a quantitative assessment of the degree of neurodegenerative changes. Based on this data, disease progression is evaluated by comparing parameters at successive time points. The introduced criteria for changes in brain structure volumes help determine the degree of pathological process progression and forecast further disease development through extrapolation of current trends. *Results and conclusions.* The algorithm has been implemented in the MATLAB programming environment, enabling automation of image processing, increased calculation accuracy, and ease of result interpretation. The developed approach was tested on clinical data from patients diagnosed with MPS 1, which confirmed its effectiveness in assessing dynamic changes in brain structures.

**Keywords:** mucopolysaccharidosis type 1 (MPS 1), magnetic resonance imaging, MRI data analysis algorithm, gray and white matter volumes, brain ventricles, change dynamics

**For citation:** Bogdanov E.V. Analysis of mucopolysaccharidosis type 1 progression based on MRI data. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):97–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-12

### Введение

Мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1) представляет собой наследственное лизосомное заболевание, обусловленное дефицитом фермента  $\alpha$ -L-идуронидазы, что приводит к накоплению гликозаминогликанов в различных тканях организма. Данная патология характеризуется прогрессирующим поражением внутренних органов, костно-суставной системы и центральной нервной системы (ЦНС), что существенно снижает качество жизни пациентов [1].

Наиболее значимые изменения в структуре головного мозга при МПС 1 выявляются с использованием методов магнитно-резонансной томографии (МРТ). Однако стандартные методы визуального анализа данных МРТ требуют значительных временных затрат и подвержены субъективным интерпретациям. В связи с этим актуальной задачей является разработка автоматизированных алгоритмов анализа томографических изображений, способных количественно оценивать динамику нейродегенеративных изменений и прогнозировать дальнейшее течение заболевания [2, 3].

Настоящее исследование направлено на разработку алгоритма обработки данных МРТ, включающего расчет объемов желудочков, серого и белого вещества, а также вычисление отклонений объемов мозговых структур от нормативных значений с учетом возраста и пола пациента [4, 5] для получения количественных параметров оценки динамики заболевания.

Предложенный алгоритм реализован в программной среде MATLAB и протестирован на клинических данных пациентов с установленным диагнозом МПС 1.

### Алгоритм анализа данных

Для структурированной обработки МРТ-данных и оценки динамики изменений предлагается последовательный алгоритм, включающий основные этапы от загрузки данных до прогнозирования дальнейшего развития патологического процесса. Данная схема упрощает процесс анализа, снижает субъективность интерпретации и позволяет проводить количественную оценку изменений структур головного мозга.

На следующем рисунке представлена блок-схема алгоритма, отражающая последовательность действий, необходимых для обработки и анализа данных (рис. 1).

На первом этапе производится ручной ввод данных:

1. Проверка возраста и пола пациента.
2. Запрос наличия данных предыдущих исследований и загрузка снимков.
3. Ввод объемов серого вещества, белого вещества и желудочков, если данные доступны или используется предыдущая серия МР-снимков.

Этот этап необходим для обеспечения индивидуального подхода к анализу данных пациента и повышения точности последующей обработки МР-снимков.

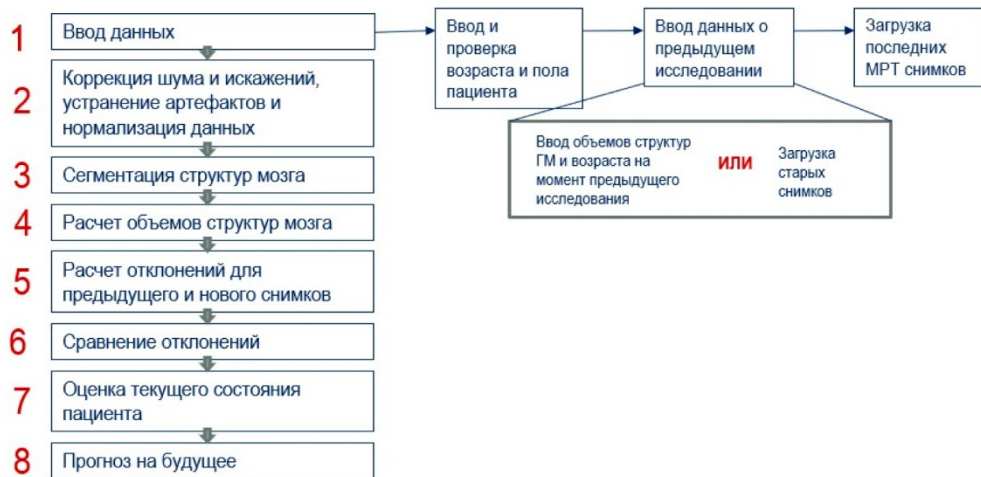


Рис. 1. Алгоритм программы

После ввода исходных данных и загрузки МР-снимков необходимо подготовить изображения для дальнейшего анализа. На этом этапе производится:

1. Предобработка данных:
  - 1) коррекция изображений с использованием вейвлет-порогового и анизотропного фильтров для снижения шума [6];
  - 2) нормализация яркости и интенсивности изображений.
2. Сегментация структур мозга:
  - 1) сегментация серого вещества, белого вещества и желудочков с использованием метода и морфологических операций [7];
  - 2) применение размытия для повышения точности сегментации.
3. Измерение объемов структур мозга: расчет объемов серого вещества, белого вещества и желудочков на основе сегментированных данных [3].

Таким образом, последовательная обработка данных – от предобработки изображений до измерения объемов – обеспечивает точное и надежное исследование структуры мозга, необходимое для дальнейшего анализа динамики заболевания.

После получения количественных данных о структуре мозга следующим шагом является их анализ в контексте возрастных и половых норм. Простое измерение объемов тканей не дает полной картины состояния пациента, поэтому необходимо сравнить их с нормативными значениями.

Для этого рассчитывается степень отклонения объемов серого вещества, белого вещества и желудочков от средних значений для соответствующей возрастной и половой группы. Это позволяет определить, насколько выражены потенциальные патологические изменения.

Расчет отклонений от нормы:

1. Вычисление отклонений объемов структур мозга от возрастных и половых норм с использованием формулы

$$\Delta_{\text{откл}} = \frac{|V_{\text{пац}} - V_{\text{норм}}|}{\sigma_{\text{норм}}},$$

где  $V_{\text{пац}}$  – это объем ткани в мозге пациента;  $V_{\text{норм}}$  – средний объем для нормальной группы людей (в том числе с учетом пола и возраста);  $\sigma$  – стандартное отклонение для данной группы. Это позволяет определить, насколько объем ткани пациента отклоняется от средних значений для его возрастной и половой группы, что в свою очередь дает представление о том, насколько сильно развиты патологические изменения.

2. Сравнение отклонений.

После того, как отклонения для каждой ткани были вычислены, сравниваются отклонения для текущего и предыдущего снимков мозга пациента. Это необходимо для того, чтобы определить, изменилось ли состояние пациента, и если да – в какую сторону. Сравнение отклонений проводится по следующей формуле:

$$\text{Изменение отклонения} = \text{Отклонение}_{\text{новый}} - \text{Отклонение}_{\text{пред}}.$$

Если отклонение увеличивается, это может свидетельствовать о прогрессировании заболевания или ухудшении состояния пациента.

Следующим этапом является оценка текущего состояния пациента на основе этих изменений. Для этого используется нормировка изменения отклонений и вычисление вероятности ухудшения или улучшения состояния пациента. Эта вероятность оценивается с помощью формул:

$$P_{\text{ухудшение}} = \max \left( 0, \min \left( 1, \frac{\text{Изменение отклонения}}{1,5} \right) \right) \times 100;$$

$$P_{\text{улучшение}} = \max \left( 0, \min \left( 1, \frac{-\text{Изменение отклонения}}{1,5} \right) \right) \times 100,$$

где  $P_{\text{ухудшение}}$  – вероятность ухудшения состояния;  $P_{\text{улучшение}}$  – вероятность улучшения. Оба значения нормируются в диапазон от 0 до 100, что позволяет четко интерпретировать результат.

### 3. Прогнозирование изменений.

Важным этапом является прогнозирование будущих изменений состояния пациента. Для этого используются данные о текущих изменениях в отклонениях, которые экстраполируются на различные временные промежутки – например, на полгода, год или три года. Прогнозы вычисляются с помощью следующей формулы:

$$\text{Прогноз изменения отклонений} = \text{Изменение отклонений} \times (1 + t),$$

где  $t$  – временной интервал, в который мы прогнозируем изменения. Важно, что экстраполяция изменений позволяет не только отслеживать динамику отклонений, но и прогнозировать возможные ухудшения состояния пациента в будущем.

Для каждого временного промежутка рассчитываются вероятности ухудшения, улучшения и стабильности состояния пациента, используя аналогичные формулы:

$$P_{\text{ухудшение}}^{\text{прогноз}} = \max \left( 0, \min \left( 1, \frac{\text{Прогноз изменения отклонений}}{1,5} \right) \right) \times 100;$$

$$P_{\text{улучшение}}^{\text{прогноз}} = \max \left( 0, \min \left( 1, \frac{-\text{Прогноз изменения отклонений}}{1,5} \right) \right) \times 100;$$

$$P_{\text{стабильность}}^{\text{прогноз}} = 100 - P_{\text{ухудшение}}^{\text{прогноз}} - P_{\text{улучшение}}^{\text{прогноз}}.$$

Эти вероятности позволяют не только отслеживать текущие изменения, но и делать выводы о том, какое состояние пациента можно ожидать в будущем. Таким образом, алгоритм предоставляет полную картину о состоянии пациента как на текущий момент, так и с учетом возможных изменений в будущем, что является важным для принятия решений о лечении и прогнозировании его эффективности.

### Реализация алгоритма

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB и включает в себя следующие ключевые модули:

- **Обработка входных данных:** Алгоритм принимает данные МРТ-сканов в различных форматах (например, NIfTI, DICOM). Предусмотрена проверка корректности загружаемых данных.
- **Фильтрация шума:** Для повышения качества изображений используются вейвлет-пороговый и анизотропный фильтры. Эти методы устраняют артефакты и шум, сохраняя ключевые особенности изображения.
- **Сегментация:** Центральным срез изображения используется для упрощения анализа. Применяется метод Otsu для выделения серого и белого вещества, а также морфологические операции для уточнения контуров желудочков мозга.
- **Анализ отклонений:** Вычисляются отклонения от возрастных и половых норм. Эти данные интерпретируются для оценки текущего состояния пациента.
- **Прогнозирование:** На основе изменений в объемах структур мозга строится прогноз с учетом временных интервалов. Оцениваются вероятности ухудшения, улучшения или стабилизации состояния пациента.

Код алгоритма включает обработку изображений, фильтрацию, сегментацию и расчет объемов структур. Для улучшения взаимодействия с пользователем реализована система пошагового ввода данных. Алгоритм в среде MATLAB представлен на рис. 2.

```
function calculate_MPS()
% Основная функция для обработки и анализа МРТ снимка.

% Запрос возраста до цикла
age = input('Введите возраст пациента: ');
while age <= 0 || age > 120
    fprintf('Ошибка: возраст должен быть от 1 до 120 лет. Попробуйте еще раз.\n');
    age = input('Введите возраст пациента: ');
end

% Запрос пола до цикла
sex = input('Введите пол пациента (М для мужского, F для женского): ', 's');
while ~ismember(sex, {'M', 'F'})
    fprintf('Ошибка: пол должен быть M или F. Попробуйте еще раз.\n');
    sex = input('Введите пол пациента (М для мужского, F для женского): ', 's');
end

% Теперь запрашиваем, есть ли данные предыдущего исследования
previous_data = input('Известны ли данные предыдущего исследования (Да/Нет) ', 's');

if strcmp(previous_data, 'Да') || strcmp(previous_data, 'YES')
% Если данные предыдущего исследования известны
fprintf('Данные предыдущего исследования известны.\n');

% Ввод объемов для предыдущего исследования
fprintf('Введите данные по объемам структур мозга на момент предыдущего исследования. \n');
previous_white_matter = input('Введите объем белого вещества (мл) ');
previous_gray_matter = input('Введите объем серого вещества (мл) ');
previous_ventricles = input('Введите объем желудочков (мл) ');

% Ввод возраста на момент предыдущего исследования
while true
    previous_age = input('Введите возраст пациента на момент предыдущего исследования: ');
    if previous_age > 0 && previous_age <= 120
        break; % Завершаем цикл при корректном значении
    else
        fprintf('Ошибка: возраст должен быть от 1 до 120 лет. Попробуйте еще раз.\n');
    end
end

% Загрузка нового снимка
fprintf('Теперь загрузите новый снимок для анализа. \n');
new_mri_data = load_mri_data('новый');

% Суммарная оценка изменений
total_deviation_diff = weight_gray * gray_deviation_diff + ...
    weight_white * white_deviation_diff + ...
    weight_ventricle * ventricle_deviation_diff;

% Оценка вероятностей текущего состояния
probability_deterioration = max(0, min(1, total_deviation_diff / 1.5)) * 100; % Нормируем отклонение к шкале вероятностей
probability_improvement = max(0, min(1, -total_deviation_diff / 1.5)) * 100;
probability_stability = max(0, 100 - probability_deterioration - probability_improvement);

% Вывод отклонений для всех структур
fprintf('Отклонение серого вещества (предыдущий снимок) %2f, (новый снимок) %2f\n', previous_gray_deviation, new_gray_deviation);
fprintf('Отклонение белого вещества (предыдущий снимок) %2f, (новый снимок) %2f\n', previous_white_deviation, new_white_deviation);
fprintf('Отклонение желудочков (предыдущий снимок) %2f, (новый снимок) %2f\n', previous_ventricle_deviation, new_ventricle_deviation);

% Вывод изменения отклонений
fprintf('Изменение отклонений для серого вещества %2f\n', gray_deviation_diff);
fprintf('Изменение отклонений для белого вещества %2f\n', white_deviation_diff);
fprintf('Изменение отклонений для желудочков %2f\n', ventricle_deviation_diff);

% Прогнозирование на будущее
time_intervals = [0.5, 1, 3]; % Периоды, год, три года
predicted_deviation_diffs = total_deviation_diff * (1 + time_intervals); % Прогноз изменений
predicted_probabilities = arrayfun(@(diff) ...
    [max(0, min(1, diff / 1.5)) * 100, ...
    max(0, min(1, -diff / 1.5)) * 100, ...
    max(0, 100 - abs(diff) / 1.5 * 100)], ...
    predicted_deviation_diffs, 'UniformOutput', false);

% Вывод текущего состояния
fprintf('Оценка состояния \n');
fprintf('Ухудшение с вероятностью %2f%%\n', probability_deterioration);
fprintf('Улучшение с вероятностью %2f%%\n', probability_improvement);
fprintf('Отсутствие изменений с вероятностью %2f%%\n', probability_stability);

% Прогноз на будущее
for i = 1:length(time_intervals)
    fprintf('Прогноз состояния через %2f лет\n', time_intervals(i));
    fprintf('Ухудшение с вероятностью %2f%%\n', predicted_probabilities{i}(1));
    fprintf('Улучшение с вероятностью %2f%%\n', predicted_probabilities{i}(2));
    fprintf('Отсутствие изменений с вероятностью %2f%%\n', predicted_probabilities{i}(3));
end
end
```

Рис. 2. Реализация алгоритма в среде MATLAB

### Результаты и обсуждение

Пример клинического применения.

Пациент: мужчина, 15 лет, с установленным диагнозом МПС 1. Проведено два исследования МРТ с интервалом в 1 год. Объемы структур мозга представлены в табл. 1.

Таблица 1

Объемы структур мозга

| Структура мозга | Первичное исследование, см <sup>3</sup> | Повторное исследование, см <sup>3</sup> |
|-----------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Серое вещество  | 770                                     | 740                                     |
| Белое вещество  | 440                                     | 410                                     |
| Желудочки       | 55                                      | 65                                      |

Возраст пациента: **14** лет.

Диагноз: Мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1 типа).

Согласно вышеизложенным формулам MATLAB обрабатывает данные и получает результаты.

**Полученные результаты после обработки данных:**

1) отклонение для серого вещества:

- отклонение для серого вещества (первичное) = **0,67**;
- отклонение для серого вещества (последнее) = **1,33**;

2) отклонение для белого вещества:

- отклонение для белого вещества (первичное) = **0,57**;
- отклонение для белого вещества (последнее) = **1,43**;

3) отклонение для желудочков:

- отклонение для желудочков (первичное) = **0,625**;
- отклонение для желудочков (последнее) = **1,875**;

4) изменения в отклонениях:

- серое вещество:  $1,33 - 0,67 = \mathbf{0,66}$ ;
- белое вещество:  $1,43 - 0,57 = \mathbf{0,86}$ ;
- желудочки:  $1,875 - 0,625 = \mathbf{1,25}$ ;

5) расчет суммарного изменения отклонений:

Используя вес для каждой структуры (предположительно, 0,4 – для серого вещества, 0,3 – для белого вещества и 0,3 – для желудочков):

– общее изменение =  $0,4 \times 0,66 + 0,3 \times 0,86 + 0,3 \times 1,25 = 0,897$ ;

б) расчет вероятности ухудшения и прогноз состояния:

– вероятность ухудшения = **59,8 %**.

Проекция изменений на будущее (полгода, год и три года):

– для полугода:  $\approx 89,7 \%$ ;

– прогноз через 1 год  $\approx 119,6 \%$ , то есть **100 %**;

– для трех лет:  $\approx 239,2 \%$ , то есть **100 %**.

### Обсуждение

Для более полного раскрытия темы следует учитывать влияние сопутствующих факторов, таких как генетическая гетерогенность и индивидуальные особенности пациентов, на прогрессирование заболевания [8]. Кроме того, важным аспектом является развитие методов автоматизированного анализа данных МРТ с использованием алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Это позволит не только повысить точность прогнозов, но и значительно сократить время обработки данных. Интеграция многомодальных данных, включая биохимические показатели и результаты других инструментальных исследований, также представляется перспективным направлением для улучшения диагностики и мониторинга состояния пациентов [9].

Разработанный алгоритм продемонстрировал высокую точность в оценке изменений объемов структур мозга. Прогнозирование позволяет своевременно корректировать терапевтические подходы и предотвращать тяжелые осложнения, такие как гидроцефалия и эпилепсия [10]. В клинической практике данный подход может быть использован для мониторинга пациентов с МПС 1 и другими нейродегенеративными заболеваниями.

### Заключение

В ходе проведенного исследования был разработан и реализован алгоритм автоматизированного анализа магнитно-резонансных томографических данных, предназначенный для мониторинга прогрессирования мукополисахаридоза 1 типа (МПС 1). Алгоритм включает этапы предобработки изображений, сегментации структур головного мозга, количественного анализа объемов серого и белого вещества, а также желудочков. Использование метода расчета отклонений объемов мозговых структур от нормативных значений позволило объективно оценить динамику нейродегенеративных изменений и прогнозировать вероятность дальнейшего ухудшения состояния пациента.

Реализация алгоритма в среде MATLAB обеспечила высокую степень автоматизации обработки данных, что позволило сократить временные затраты на анализ и повысить точность интерпретации результатов.

Проведенное испытание алгоритма автоматизированного анализа МРТ-данных на клиническом примере пациента с мукополисахаридозом 1 типа (МПС 1) подтвердило его эффективность в оценке динамики структурных изменений головного мозга. В ходе анализа были успешно выполнены все ключевые этапы: предобработка изображений, сегментация серого и белого вещества, а также желудочков мозга, что позволило провести количественную оценку объемов этих структур. Полученные результаты были сопоставлены с возрастными и половыми нормативами, что обеспечило объективную интерпретацию данных.

Выявленные изменения мозговых структур коррелировали с клиническими проявлениями заболевания, подтверждая значимость предложенного алгоритма для мониторинга состояния пациентов. Автоматизированный подход позволил минимизировать влияние субъективных факторов и повысить точность измерений. Таким образом, разработанный метод может быть полезен для динамического наблюдения за пациентами с МПС 1, оценки эффективности терапии и дальнейших исследований, направленных на изучение нейродегенеративных процессов при данном заболевании [10].

Полученные результаты подтверждают значимость разработки методов количественного анализа МРТ-данных для диагностики и мониторинга редких наследственных заболеваний, включая МПС 1. Внедрение автоматизированных алгоритмов обработки изображений способствует повышению объективности оценки состояния пациентов, что особенно важно в условиях прогрессирующих нейродегенеративных заболеваний.

Дальнейшее развитие предложенного подхода предполагает интеграцию алгоритма с методами машинного обучения и искусственного интеллекта, что позволит повысить точность прогнозов и адаптировать анализ к индивидуальным особенностям пациентов.

### Перспективы

Дальнейшее развитие алгоритма предполагает интеграцию данных лабораторных и инструментальных исследований, что позволит повысить точность прогнозов. Также актуально использование методов искусственного интеллекта для обработки больших объемов данных и повышения эффективности анализа. Кроме того, перспективным направлением является объединение данных нейровизуализации с биохимическими и генетическими маркерами заболевания, что может привести к созданию комплексных моделей персонализированного мониторинга состояния пациентов с МПС 1.

### Список литературы

1. Вашакмадзе Н. Д. Применение методов нейровизуализации для диагностики и мониторинга прогрессирования редких наследственных заболеваний // Вестник радиологии. 2020. № 5. С. 45–52.
2. Palmucci S. [et al.]. Imaging findings of mucopolysaccharidoses: a pictorial review // Insights Imaging. 2013. № 4. P. 443–459.
3. Reichert R. Neuroimaging Findings in Patients with Mucopolysaccharidosis: What You Really Need to Know // RadioGraphics. 2016. Vol. 36, № 5. P. 1448–1462.
4. Nagano R. Three-dimensional CT and histopathological findings of airway malacia in Hunter syndrome // Tokai J Exp Clin Med. 2007. Vol. 32. № 2. P. 59–61.
5. Союз педиатров России. Мукополисахаридоз I типа у детей : клинические рекомендации. М. : Союз педиатров России, 2016. 32 с.
6. Davison J. E. Quantitative in vivo brain magnetic resonance spectroscopic monitoring of neurological involvement in mucopolysaccharidosis type II (Hunter Syndrome) // Journal of Inherited Metabolic Disease: Official Journal of the Society for the Study of Inborn Errors of Metabolism. 2010. Vol. 33. P. 395–399.
7. Davison J. E. Intellectual and neurological functioning in Morquio syndrome (MPS IVa) // Journal of inherited metabolic disease. 2013. Vol. 36. P. 323–328.
8. Rasalkar D. D. Pictorial review of mucopolysaccharidosis with emphasis on MRI features of brain and spine // The British journal of radiology. 2011. Vol. 84, № 1001. P. 469–477.
9. Jan Ya-Ting. Adjunct diagnostic value of radiological findings in mucopolysaccharidosis type IVa-related thoracic spinal abnormalities: a pilot study // Orphanet journal of rare diseases. 2022. Vol. 17, № 1. P. 296.
10. Mandolfo O. Innate Immunity in Mucopolysaccharide Diseases // International journal of molecular sciences. 2022. Vol. 23, № 4. P. 1999.

### References

1. Vashakmadze N.D. Application of neuroimaging methods for diagnosis and monitoring of the progression of rare hereditary diseases. *Vestnik radiologii = Bulletin of Radiology*. 2020;(5):45–52. (In Russ.)
2. Palmucci S. et al. Imaging findings of mucopolysaccharidoses: a pictorial review. *Insights Imaging*. 2013;(4):443–459.
3. Reichert R. Neuroimaging Findings in Patients with Mucopolysaccharidosis: What You Really Need to Know. *RadioGraphics*. 2016;36(5):1448–1462.
4. Nagano R. Three-dimensional CT and histopathological findings of airway malacia in Hunter syndrome. *Tokai J Exp Clin Med*. 2007;32(2):59–61.
5. *Soyuz pediatrov Rossii. Mukopolisakharidoz I tipa u detey: klinicheskie rekomendatsii = Union of Pediatricians of Russia. Type I mucopolysaccharidosis in children : clinical recommendations*. Moscow: Soyuz pediatrov Rossii, 2016:32. (In Russ.)
6. Davison J.E. Quantitative in vivo brain magnetic resonance spectroscopic monitoring of neurological involvement in mucopolysaccharidosis type II (Hunter Syndrome). *Journal of Inherited Metabolic Disease: Official Journal of the Society for the Study of Inborn Errors of Metabolism*. 2010;33:395–399.
7. Davison J.E. Intellectual and neurological functioning in Morquio syndrome (MPS IVa). *Journal of inherited metabolic disease*. 2013;36:323–328.
8. Rasalkar D.D. Pictorial review of mucopolysaccharidosis with emphasis on MRI features of brain and spine. *The British journal of radiology*. 2011;84(1001):469–477.
9. Jan Ya-Ting. Adjunct diagnostic value of radiological findings in mucopolysaccharidosis type IVa-related thoracic spinal abnormalities: a pilot study. *Orphanet journal of rare diseases*. 2022;17(1):296.
10. Mandolfo O. Innate Immunity in Mucopolysaccharide Diseases. *International journal of molecular sciences*. 2022;23(4):1999.

*Информация об авторах / Information about the authors***Евгений Владимирович Богданов**

аспирант,

Российский научный центр хирургии

имени академика Б. В. Петровского

(Россия, г. Москва, ул. Фотиевой, 10, с. 1)

E-mail: Evgeniy.bogdanov95@gmail.com

**Evgeniy V. Bogdanov**

Postgraduate student,

Russian Scientific Center of Surgery

named after academician B.V. Petrovsky

(build. 1, 10 Fotieva street, Moscow, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /****The author declares no conflicts of interests.****Поступила в редакцию / Received 03.03.2025****Поступила после рецензирования / Revised 28.03.2025****Принята к публикации / Accepted 07.04.2025**