

УДК 004

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ЗДОРОВЬЯ РАБОТНИКОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ МЕДОСМОТРОВ: ОТ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ РИСКОВ К ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ**

К.Д. Фатхуллин, аспирант 3 курса, гр. ММЧМиКП

Научный руководитель: Грунсков Тарас Валерьевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ХХТЭиТБ

ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта

Периодические медицинские осмотры являются ключевым инструментом контроля здоровья работников, подвергающихся воздействию вредных производственных факторов. Однако их эффективность часто снижается из-за двух проблем: результаты осмотров за несколько лет представляют собой огромные, плохо структурированные массивы информации, анализ которых вручную затруднен, а также многие профессиональные заболевания на доклинической стадии проявляются не диагнозами, а множественными слабовыраженными отклонениями в разных системах организма. По отдельности они не привлекают внимания, но вместе формируют характерный «почерк» вредного фактора. Следует отметить, что при периодических медицинских осмотрах, которые должны проводиться через одинаковые промежутки времени после исходного предварительного медицинского осмотра (по подавляющему большинству вредных производств - ежегодно), большое значение имеет правильный выбор органов и систем, подлежащих пристальному изучению в зависимости от точки приложения действующего неблагоприятного фактора, а также соответствующего комплекса методов исследования [1]. Однако выявление групп риска — это только первый шаг. Эффективное управление здоровьем работников требует перехода к персонифицированному прогнозированию, то есть к предсказанию того, как будут изменяться ключевые параметры здоровья у конкретного человека под влиянием продолжающегося воздействия вредных факторов. Это позволит не только идентифицировать проблему, но и своевременно назначать профилактические мероприятия. В связи с этим целью данной работы является не только выявление устойчивых паттернов нарушений, но и разработка метода индивидуального прогнозирования ключевых параметров здоровья на основе многолетних ретроспективных данных.

**Методы анализа данных медосмотров****1. Источник данных.**

Проанализированы обезличенные результаты периодических медицинских осмотров 76 работников за 5-летний период (2019-2023 гг.). Данные охватывали все стандартные разделы медосмотра: кардиология, спирометрия,

аудиометрия, общий и биохимический анализы крови, антропометрия, динамометрия.

## 2. Аналитический процесс.

Процесс состоял из двух автоматизированных этапов. Первый этап: очистка данных, приведение к единому формату, расчет интегрального показателя «степени отклонения» для каждого работника. Заполнение пропущенных категориальных данных осуществлялось аналогично, только вместо расчета средних значений использовалась мода.

Второй этап: алгоритм сканировал все параметры, отбирая те, которые соответствовали строгим критериям, свидетельствующим о системном, а не случайном характере нарушений. Разработка данных критериев основана на принципах операционализации — ключевого методологического подхода в эмпирических науках, который заключается в переводе теоретических понятий («хроническое нарушение», «коллективный риск») в конкретные, измеримые и воспроизводимые индикаторы, подобная проблема затронута в статье [2]. В рамках этого подхода были формализованы и применены следующие три критерия:

1. Критерий средней частоты нарушений обеспечивает отбор параметров, систематически выходящих за границы нормы в группе, что исключает случайные флуктуации.
2. Критерий устойчивости гарантирует, что нарушения носят не эпизодический, а хронический характер, повторяясь в течение большей части периода наблюдения.
3. Критерий распространённости указывает на коллективный, а не индивидуальный характер отклонений, что является ключевым признаком возможного влияния общего производственного фактора.

## 3. Статистическая валидация критериев отбора

Для подтверждения обоснованности выбранных пороговых значений и доказательства того, что выделенные с их помощью параметры действительно образуют отдельную, неслучайную группу, была проведена процедура статистической валидации. Мы сформулировали нулевую гипотезу о том, что распределения значений критериев (средний процент нарушений, устойчивость, распространённость) для группы «ключевых» параметров, отобранных алгоритмом, не отличаются от распределений для группы «неключевых» параметров.

Для проверки этой гипотезы использован непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Выбор критерия обусловлен возможным отсутствием нормального распределения в сравниваемых выборках (что впоследствии подтвердилось проверкой на нормальность) [3]. Анализ проводился для всех параметров, которые были разделены на две группы по результатам работы алгоритма

(ключевые, неключевые). Для каждого из трех критериев отбора рассчитывалась U-статистика, р-уровень значимости и размер эффекта, результаты сведены в таблицу:

Таблица 1 - Результаты сравнения групп ключевых и неключевых параметров с помощью U-критерия Манна-Уитни

| Критерий    | U-статистика | р-значение           | Размер эффекта (r) |
|-------------|--------------|----------------------|--------------------|
| $\bar{V}_p$ | 768          | $4,6 \cdot 10^{-8}$  | 0.63               |
| $R_p$       | 768          | $5,9 \cdot 10^{-16}$ | 0.63               |
| $P_p$       | 768          | $4,5 \cdot 10^{-8}$  | 0.63               |

Размер эффекта (r) рассчитан как  $\frac{z}{\sqrt{N}}$ .  $\frac{z}{\sqrt{N}} > 0.5$  интерпретируется как большой эффект. Полученные результаты показывают статистически значимые различия между двумя группами по всем критериям ( $p < 0.001$ ). Размер эффекта во всех случаях является большим ( $r = 0.63$ ), который свидетельствует о высокой практической значимости найденных различий.

#### 4. Индивидуальное прогнозирование.

Для каждого работника и каждого выявленного на предыдущем этапе (алгоритмический этап) ключевого параметра была построена прогностическая модель. В качестве модели использовалась линейная регрессия. Для работников, имевших не менее двух измерений параметра за период 2019-2022 гг., модель обучалась на этих данных, после чего делался прогноз на 2023 год. Качество прогноза оценивалось путем сравнения прогнозного значения с фактическим значением за 2023 год. Использовались следующие метрики: средняя абсолютная ошибка, корень из квадратичной ошибки, коэффициент детерминации, также был проведен расчет общей ошибки прогноза по всем работникам и параметрам для получения интегральной оценки.

#### 5. Выявленные закономерности как индикаторы потенциальных рисков

Анализ выявил синхронные тенденции ухудшения здоровья у значительной части работников из имеющейся выборки.

У 94-100 % работников выявлено стабильно снижен показатель FEF75% (скорость выдоха на уровне мелких бронхов), что является ранним признаком обструктивных изменений. Одновременно отмечалась динамика от повышенных к сниженным значениям индекса FEV1/VC (индекс Тиффно), что может указывать на присоединение рестриктивного компонента [4]. Возможное воздействие аэрозолей фиброгенного или раздражающего действия (пыль, дым, газы), ведущих к хроническому бронхиту, начальным стадиям пневмокониоза.

Нарастание частоты нарушений продолжительности электрической систолы желудочков (QRS на ЭКГ) и лабильность артериального давления. Может быть связано с воздействием факторов, вызывающих стресс и напряжение (вибрация, шум, нервно-эмоциональная нагрузка). Одной из ключевых причин расширения комплекса QRS более 0,10 с является блокада ножек пучка Гиса — нарушение проведения электрического импульса по проводящим путям желудочков [5].

Параметр АЛТ (аланинаминотрансфераза) показал негативную динамику: доля работников с его снижением ниже нормы возросла с 25 до 47 процентов в период с 2022 по 2023 годы. Рост процента нарушений может отражать накопление усталости и срыв адаптационных механизмов у все большей части работников под действием хронического фактора (комбинированное действие: шум, химический фактор, стресс). Подобное изменение обнаружили в процессе оценки ферментативной функции печени при длительном воздействии малых доз хрома и его соединений на организм в статье [6], что говорит о том, что изменения аланинаминотрансферазы происходят под воздействием фиброгенного и/или токсического действия.

На основании алгоритмического анализа многолетних данных были выявлены устойчивые закономерности отклонений, затрагивающие различные системы организма. Эти нарушения, их связь с возможными производственными факторами и пораженными системами сведены в таблицу ниже (см. Рисунки 1 для визуализации распространённости нарушений):

Таблица 2 - Сводная таблица выявленных закономерностей нарушений здоровья и возможных производственных факторов

| Выявленная закономерность | Пораженная система  | Потенциальный (предполагаемый) производственный фактор |
|---------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
| Снижение FEF75%           | Органы дыхания      | Производственная пыль, газы, аэрозоль                  |
| Нарушение QRS на ЭКГ      | Сердечно-сосудистая | Стресс, вибрация                                       |
| Снижение АЛТ              | Печень              | Химические токсиканты, авитаминоз                      |

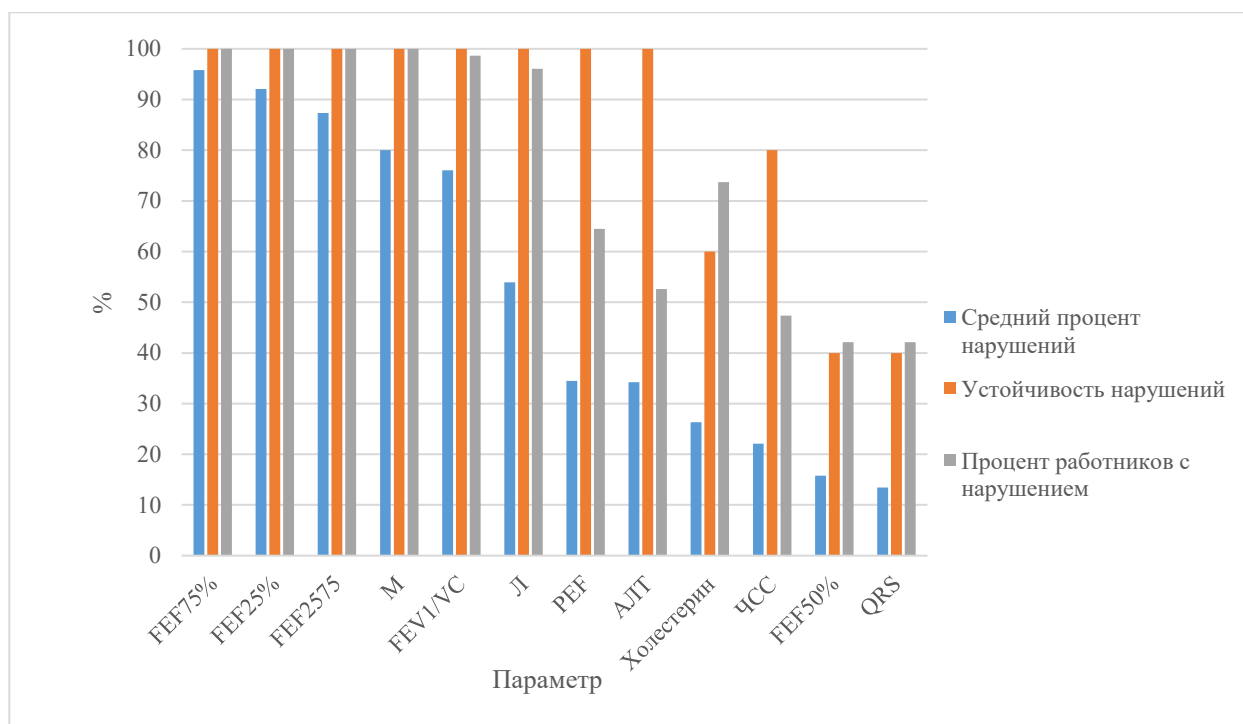


Рисунок 1 - Распространенность нарушений

## 6. Результаты индивидуального прогнозирования

Результаты прогнозирования представлены в таблице, в ней видно, что большинство параметров прогнозируется хорошо, однако есть и те параметры, чей прогноз оказался неудовлетворительным. Предполагаем, что параметры с низкой прогнозной оценкой имеют нелинейную динамику.

Таблица 3 – Таблица метрик качества

| Параметр   | MAE  | RMSE  | R <sup>2</sup> | Интерпретация      |
|------------|------|-------|----------------|--------------------|
| FEF25%     | 0.27 | 0.50  | 0.91           | Отличный прогноз   |
| FEF50%     | 0.22 | 0.38  | 0.90           | Отличный прогноз   |
| FEF2575    | 0.22 | 0.40  | 0.86           | Хороший прогноз    |
| PEF        | 0.31 | 0.54  | 0.85           | Хороший прогноз    |
| FEV1/VC    | 0.89 | 1.23  | 0.85           | Хороший прогноз    |
| Холестерин | 0.29 | 0.36  | 0.59           | Удовлетворительный |
| M          | 0.89 | 1.16  | 0.62           | Удовлетворительный |
| ЧСС        | 8.41 | 11.44 | 0.37           | Низкий             |
| АЛТ        | 0.70 | 1.01  | -7.60          | Неприменимо        |
| Л          | 9.48 | 9.66  | -42.07         | Неприменимо        |
| QRS        | 0.55 | 4.23  | -681.13        | Неприменимо        |

Отрицательные значения коэффициента детерминации для параметров «Л» (разборчивость речи), «АЛТ» и «QRS» указывают на то, что линейная модель неадекватно описывает динамику этих показателей. Это может быть связано с:

нелинейным характером изменений (например, резкое ухудшение слуха после достижения порогового стажа);  
недостаточным количеством точек для построения надежной регрессии.

Для таких параметров требуется либо применение нелинейных моделей, либо исключение из процедуры прогнозирования с переводом в категорию качественных индикаторов риска.

#### Заключение и выводы

В ходе выполнения работы разработан и апробирован комплексный двухэтапный метод анализа лонгитюдных данных периодических медицинских осмотров, направленный на выявление скрытых профессиональных рисков и построение индивидуальных прогнозов. Предложенный подход позволяет службе охраны труда перейти от реактивной модели (реагирование на уже возникшие заболевания) к проактивной модели управления рисками, основанной на количественном анализе данных. Применение формальных критериев (средняя частота, устойчивость, распространенность нарушений) позволило в автоматизированном режиме идентифицировать группу ключевых параметров-маркеров (FEF75%, QRS, АЛТ), демонстрирующих системные, а не случайные отклонения. Статистическая валидация с помощью U-критерия Манна-Уитни подтвердила, что выделенная группа параметров имеет принципиально иное распределение ( $p < 0.001$ , большой размер эффекта), что обосновывает корректность выбранных пороговых значений и методологии отбора. Построенные линейные регрессионные модели продемонстрировали высокую прогнозную точность ( $R^2 > 0.7$ , MAE и RMSE на низком уровне) для параметров функции внешнего дыхания (FEF25%, FEF50%, FEF2575, PEF, FEV1/VC), а также для показателей «Холестерин» и «М». Это подтверждает наличие устойчивого линейного тренда в динамике этих показателей для обследованной группы и позволяет с высокой достоверностью прогнозировать их индивидуальные значения. Для параметров «Л» (разборчивость речи), «АЛТ» и «QRS» линейная модель оказалась неприменима (отрицательные значения  $R^2$ ). Полученный результат не является свидетельством "плохого" прогноза, а указывает на нелинейный, пороговый характер динамики этих важнейших индикаторов здоровья.

Основным ограничением работы является отсутствие независимой контрольной группы работников с установленными профессиональными заболеваниями, что не позволяет на данном этапе однозначно оценить специфичность и прогнозную ценность выделенных индикаторов. Представленные результаты следует рассматривать как обоснование гипотез для последующих исследований. Окончательное подтверждение профессиональной природы выявленных изменений требует сопоставления с данными специальной оценки условий труда (СОУТ) и углубленного обследования работников.

### Список литературы:

1. Шамсияров, Н. Н. Проблемы и перспективы медицинских осмотров работников, занятых во вредных условиях труда: финансово-экономический аспект / Н. Н. Шамсияров // Вестник Казанского технологического университета. - 2011. - С. 284-291.
2. Чечеткина, И. И. Операционализм в науке: истоки, возможности и пределы (на примерах из истории физики и химии) / И. И. Чечеткина // Современные философские исследования. - 2017. - №3. - С. 100-111.
3. U-КРИТЕРИЙ МАННА-УИТНИ [Электронный ресурс]. – 2026. – Режим доступа: <https://medstatistic.ru/methods/methods2.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
4. Панфилов, Ю. А. Спирометрия в клинической практике / Ю. А. Панфилов, В. А. Луняков // Земский врач. - 2017. - С. 21-26.
5. Нестерова, Е. А. Основы электрокардиографии. Нормальная ЭКГ / Е. А. Нестерова // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. - 2016. - №2. - С. 77-85.
6. Садртдинова, Г.Р. Состояние ферментативной функции печени у работников при наличии хрома в воздухе рабочей зоны / Г. Р. Садртдинова, Л. М. Масягутова, Г. М. Чудновец, Н. Р. Газизова // Медицина труда и экология человека. - 2019. - №2. - С. 57-62.