

Интерпретируемое мультимодальное машинное обучение для диагностики лекарственно-устойчивого туберкулёза

Источник: Frontiers in Digital Health

Оригинал: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fdgth.2026.1828522>

диагностика

интерпретируемость

инфекционные заболевания

машинное обучение

мультимодальный ИИ

рентгенография

туберкулёз

Введение

Раннее выявление лекарственно-устойчивого туберкулёза (ЛУ-ТБ) имеет критическое значение для своевременного лечения и ограничения передачи инфекции. Дифференциация ЛУ-ТБ от чувствительного к лекарствам туберкулёза (ЧЛ-ТБ) остаётся сложной задачей из-за перекрывающихся проявлений и незначительных различий на рентгенограммах грудной клетки (РГК).

Методы

Мы разработали объяснимую мультимодальную систему машинного обучения, интегрирующую эмбединги РГК из Data-Efficient Image Transformer (DEiT) с данными на уровне пациентов, включая клинические, интерпретированные радиологические, демографические, социально-экономические и поведенческие переменные. Используя данные 6 279 пациентов из программы TB Portals, производительность модели оценивалась в трёх условиях: только эмбединги РГК, только признаки на уровне пациентов и мультимодальный подход. Интерпретируемость анализировалась с использованием Shapley Additive Explanations (SHAP).

Результаты

Мультимодальная модель XGBoost достигла площади под кривой точности-полноты (PR-AUC) 0,9258 и площади под характеристической кривой (ROC-AUC) 0,8718. Классификаторы только на эмбедингах РГК показали более низкие результаты (PR-AUC: 0,8334; ROC-AUC: 0,7369), в то время как XGBoost на уровне пациентов продемонстрировал наивысшую производительность. Мультимодальная модель улучшила интерпретируемость за счёт дополнительной структурной информации. SHAP выявил эмбединги РГК как основные глобальные драйверы. Среди переменных на уровне пациентов ежедневные контакты и статус занятости были наиболее значимыми факторами, отражая интенсивность воздействия и социально-экономические условия. Коморбидность показала умеренные эффекты, в то время как образование и определение случая внесли меньший вклад. Ключевые радиологические факторы включали нетуберкулёзные аномалии и вовлечение медиастинальных лимфатических узлов, тогда как фиброзные узелки средней плотности со стабилизацией, узелки среднего размера и небольшие каверны продемонстрировали минимальную ассоциацию. Анализ взаимодействий выявил повышенный риск при увеличении коморбидности в присутствии морфологических изменений; ИМТ (индекс массы тела) и возраст оказали скромное влияние. Независимая оценка двумя клиницистами подтвердила правдоподобность и согласованность объяснений SHAP.

Обсуждение

Эта объяснимая мультимодальная система поддерживает раннее выявление ЛУ-ТБ и целевые вмешательства в условиях высокой распространённости заболевания.