

## Trí tuệ nhân tạo trong gây mê hồi sức và phẫu thuật

Artificial intelligence in anesthesia, resuscitation and surgery

Phạm Văn Huệ<sup>a\*</sup>, Nguyễn Tất Dũng<sup>a</sup>, Phạm Thanh Minh<sup>a</sup>, Nguyễn Đăng Phước<sup>a</sup>,  
Nguyễn Thị Hằng<sup>b</sup>  
Pham Van Hue<sup>a\*</sup>, Nguyen Tat Dung<sup>a</sup>, Pham Thanh Minh<sup>a</sup>, Nguyen Dang Phuoc<sup>a</sup>,  
Nguyen Thi Hang<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Bệnh viện Trung ương Huế, thành phố Huế, Việt Nam

<sup>a</sup>Hue Central Hospital, Hue City, Vietnam

<sup>b</sup>Trường Cao đẳng Y tế Huế, thành phố Huế, Việt Nam

<sup>b</sup>Hue Medical College, Hue City, Vietnam

(Ngày nhận bài: 11/10/2024, ngày phản biện xong: 23/10/2024, ngày chấp nhận đăng: 11/11/2024)

### Tóm tắt

Sự an toàn của bệnh nhân trong toàn bộ quá trình phẫu thuật là ưu tiên y tế trên toàn cầu. Tỷ lệ tử vong sau phẫu thuật là một chỉ số quan trọng để đánh giá chất lượng, độ an toàn của gây mê và phẫu thuật [1]. Bác sĩ gây mê không chỉ chịu trách nhiệm về gây mê và quản lý tổng thể trong quá trình phẫu thuật mà còn giúp tối ưu hóa các tình trạng kèm theo của bệnh nhân để đảm bảo an toàn cho bệnh nhân trong giai đoạn phẫu thuật. Ngày nay, vai trò của bác sĩ gây mê vượt ra ngoài phòng phẫu thuật, nơi họ không chỉ đối phó với các biến chứng sau phẫu thuật mà còn kiểm soát cơn đau sau phẫu thuật, giảm đau chuyên dạ, hồi sức tim phổi, trong các liệu pháp hô hấp. Vai trò mở rộng này có thể giúp giảm tỷ lệ mắc bệnh và tử vong sau phẫu thuật, điều này rất phổ biến, không giống như tỷ lệ tử vong hiếm gặp trong phẫu thuật. Tử vong sau phẫu thuật, nếu được coi là một loại bệnh, sẽ là nguyên nhân gây tử vong đứng hàng thứ ba ngay sau bệnh tim và ung thư [2]. Các tiến bộ nhanh chóng trong công nghệ thông tin như trí tuệ nhân tạo cung cấp cơ hội để xây dựng các phương pháp an toàn trong giai đoạn phẫu thuật. Trí tuệ nhân tạo giúp phân tích dữ liệu phức tạp trên các hệ thống khác nhau và tạo ra thông tin có thể hành động. Những tiến bộ gần đây trong kỹ thuật trí tuệ nhân tạo đã cho phép phát triển các mô hình dự đoán chính xác bằng cách sử dụng dữ liệu lớn về lâm sàng. Các mô hình trí tuệ nhân tạo để phân tầng rủi ro sau phẫu thuật, dự đoán sự kiện trong phẫu thuật, phân tích tín hiệu sinh học và y học chăm sóc tích cực đã được phát triển trong lĩnh vực y học chu phẫu.

*Từ khóa:* An toàn chu phẫu; tỷ lệ tử vong; bác sĩ gây mê, biến chứng sau mổ; trí tuệ nhân tạo, mô hình dự đoán.

### Abstract

Patient perioperative safety is a global medical priority. The perioperative mortality is an important indicator for evaluating the quality and safety of anaesthesia and surgery [1]. An anesthesiologist is not only responsible for the anesthesia and overall medical management during surgery but also helps in optimizing the comorbid conditions of patients for the safe outcome of patients in the perioperative period. These days, the role of anesthesiologists extends beyond operating rooms where they not only deal with complications of anesthesia postoperatively but also manage postoperative pain, labor analgesia, in cardiac and respiratory resuscitation, in respiratory therapies. This expanded role can help reduce postoperative morbidity and mortality, which are regrettably common, unlike rare intraoperative

\*Tác giả liên hệ: Phạm Văn Huệ

Email: huephamiris@gmail.com

mortality. Postoperative mortality, if considered a disease category, will be the third leading cause of death just after heart disease and cancer [2]. Rapid advances in technologies like artificial intelligence provide an opportunity to build safe perioperative practices. Artificial intelligence helps by analyzing complex data across disparate systems and producing actionable information.

Recent advancements in artificial intelligence (AI) techniques have enabled the development of accurate prediction models using clinical big data. AI models for perioperative risk stratification, intraoperative event prediction, biosignal analyses, and intensive care medicine have been developed in the field of perioperative medicine.

*Keywords:* Perioperative safety; mortality; anesthesiologist; postoperative complications; artificial intelligence; prediction models.

## 1. Giới thiệu

Sự an toàn của bệnh nhân trong toàn bộ quá trình phẫu thuật là ưu tiên y tế trên toàn cầu. Tỷ lệ tử vong sau phẫu thuật là một chỉ số quan trọng để đánh giá chất lượng, độ an toàn của gây mê và phẫu thuật [1]. Hiện nay, tỷ lệ tử vong sau phẫu thuật cao hơn rất nhiều so với tử vong trong quá trình phẫu thuật. Tử vong sau phẫu thuật nếu được coi là một loại bệnh, sẽ là nguyên nhân gây tử vong đứng hàng thứ ba ngay sau bệnh tim và ung thư [2]. Câu hỏi quan trọng là: liệu các bác sĩ gây mê hồi sức có thể giúp giảm tỷ lệ tử vong và biến chứng trong giai đoạn chu phẫu không?

Cách tiếp cận dựa trên dữ liệu và trí tuệ nhân tạo (AI: Artificial intelligence) có thể giúp bác sĩ gây mê hồi sức đặt kế hoạch chăm sóc tốt hơn. Bác sĩ gây mê hồi sức cần đánh giá một cách nghiêm túc về các thành phần cơ bản của cuộc mê, bao gồm đạt được tình trạng giảm đau, an thần, giãn cơ, cung cấp oxy, huyết động và chức năng các cơ quan. Bác sĩ gây mê cần đánh giá chính xác rủi ro và điều chỉnh kế hoạch gây mê dựa trên việc thăm khám lâm sàng, cận lâm sàng cho từng bệnh nhân cụ thể trong toàn bộ quá trình phẫu thuật. Ngoài ra, việc đánh giá và duy trì các thông số như độ sâu gây mê, đường huyết, hồng cầu, điện giải và nhiệt độ cơ thể, là rất quan trọng để đạt được thành công. Kết quả là số lượng và độ phức tạp của dữ liệu chu phẫu tăng lên, đòi hỏi xử lý ngay tại thời điểm thực hiện để đưa ra quyết định lâm sàng chính xác [3]. Trí tuệ nhân tạo (AI) giúp bác sĩ hiểu rõ các thông tin này và xây dựng các công cụ hỗ trợ quyết định trên lâm sàng. AI sử dụng cơ sở dữ liệu có sẵn được gọi là “big data” để xây dựng thuật toán.

Các thuật toán này sẽ phân tích các dữ liệu khác nhau giúp bác sĩ chẩn đoán sớm, đánh giá chính xác rủi ro, quản lý trong phẫu thuật, phân phối thuốc tự động, dự đoán gây mê, biến chứng phẫu thuật và kết quả sau phẫu thuật dẫn đến quản lý chu phẫu hiệu quả cũng như giảm chi phí điều trị.

## 2. AI hoạt động thế nào?

AI hay trí tuệ nhân tạo là lĩnh vực khoa học xây dựng các hệ thống máy tính có khả năng mô phỏng trí tuệ của con người. AI nghiên cứu về các thuật toán cung cấp cho máy móc khả năng lý luận và thực hiện các chức năng như giải quyết vấn đề, nhận dạng đối tượng, từ ngữ, suy luận về các trạng thái và ra quyết định. Nó cũng là một nhóm các kỹ thuật tính toán đa dạng như học máy (machine learning - ML), học sâu (deep learning - DL) và xử lý ngôn ngữ tự nhiên (natural language processing - NLP).

Các kỹ thuật học máy, giúp máy tính học được các mẫu hình trong một lượng lớn dữ liệu và có thể được sử dụng để xây dựng các mô hình phân loại và dự đoán. Sử dụng học máy trên các dạng sóng áp suất động mạch (phần mềm Acumen HPI), Hatib và cộng sự đã dự đoán hạ huyết áp trong phẫu thuật trước 15 phút với độ nhạy và độ đặc hiệu là 88% (85%-90%) và 87% (85%-90%; diện tích dưới đường cong [AUC], 0,95 [0,94–0,95]) [4].

Học sâu là một phân ngành của học máy sử dụng nhiều lớp mạng lưới thần kinh được kết nối, giống như bộ não của con người, để dần dần trích xuất các đặc điểm cấp cao hơn từ dữ liệu đầu vào thô. Ghorbani và cộng sự đã sử dụng nhận dạng hình ảnh và học sâu để xác định chính xác các cấu

trúc tim trong hình ảnh siêu âm tim. Họ có thể xác định sự hiện diện của dây dẫn máy tạo nhịp tim, tâm nhĩ trái lớn, phì đại thất trái, thể tích cuối tâm trương và thể tích cuối tâm thu thất trái và phân suất tổng máu với độ chính xác cao [5].

Một kỹ thuật AI khác là xử lý ngôn ngữ tự nhiên (NLP), được sử dụng đặc biệt để hiểu nội dung được nói hoặc viết. Xu và cộng sự đã phát triển một mô hình học máy đa phương thức sử dụng ghi chú của bác sĩ lâm sàng và dữ liệu có cấu trúc liên quan để dự đoán chính xác các mã chẩn đoán theo phân loại bệnh tật quốc tế ICD-10, một nhiệm vụ phức tạp thường do các nhân viên mã hóa giàu kinh nghiệm thực hiện [6].

Dựa trên thông tin đầu vào từ các chuyên gia, ứng dụng trí tuệ nhân tạo giúp phát triển các hệ thống tự động hoặc robot hỗ trợ trong việc phân phối thuốc, robot cơ học thực hiện các nhiệm vụ chính xác và robot nhận thức hay còn gọi là hệ thống hỗ trợ quyết định. Các hệ thống tự động ngày càng quan trọng đối với an toàn của bệnh nhân, đặc biệt trong bối cảnh lực lượng lao động ngày càng già hóa. Trí tuệ nhân tạo có thể giúp thay đổi đánh giá chủ quan thành đánh giá khách quan. Chẳng hạn như đánh giá đau là một trong những đánh giá lâm sàng khó khăn và chủ quan, đặc biệt trong điều kiện gây mê. Tuy nhiên hiện nay đánh giá đau được thực hiện khách quan bằng cách sử dụng kết hợp điện tâm đồ, biểu đồ đo thể tích, độ dẫn điện của da, phản xạ thần kinh giao cảm. Chỉ số đánh giá mức độ đau khách quan từ 0 (không đau) – 100 (đau nghiêm trọng) [7]. Nếu mức độ đau trên giới hạn của ngưỡng đau, opioid sẽ được yêu cầu sử dụng. Mặt khác bệnh nhân nặng hơn có nhiều khả năng trải qua các kết quả không tốt, phân tầng rủi ro giúp điều chỉnh kế hoạch gây mê cho từng bệnh nhân, giảm thiểu sự khác biệt giữa các bệnh nhân. Do đó, các hệ thống hỗ trợ quyết định tại thời điểm cần thiết dựa trên AI có thể hỗ trợ thực hành lâm sàng dựa trên bằng chứng và cải thiện kết quả điều trị bệnh nhân.

### 3. Trí tuệ nhân tạo trong gây mê phẫu thuật

Việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong lĩnh vực gây mê phẫu thuật nhằm cung cấp sự an toàn, kịp thời và hiệu quả cho bệnh nhân giai đoạn chu phẫu. Cụ thể nó tập trung vào ba lĩnh vực: xác định bệnh nhân có nguy cơ cao, phát hiện sớm các biến chứng, thực hiện điều trị kịp thời và hiệu quả.

#### 3.1. Xác định bệnh nhân có nguy cơ cao: phân tích dự đoán

Phân tích dự đoán là ứng dụng trí tuệ nhân tạo phổ biến nhất trong lĩnh vực chăm sóc sức khỏe. Các mô hình học máy (Machine Learning - ML) được sử dụng để dự đoán các sự kiện nhị phân, chẳng hạn như vào viện lại và tử vong. Điều này hợp lý vì dữ liệu hành chính được sử dụng cho các mô hình này có sẵn trên diện rộng và các bệnh viện đều hướng mục tiêu giảm tỷ lệ vào viện lại và tử vong. Ví dụ về các mô hình này bao gồm chỉ số phân tầng rủi ro (RSI), chỉ số nguy cơ tim mạch sửa đổi (RCRI) và thang điểm trước mổ để dự đoán tỷ lệ tử vong sau mổ (POSPUM) [8]. Các mô hình này sử dụng phương pháp phân tích hồi quy và không nên xem như kỹ thuật dự đoán rủi ro ngay thời điểm thực tại. Các mô hình dự đoán khác có sử dụng học máy đã ước tính được thời gian xuất viện trong vòng 24 giờ sau phẫu thuật [9]. Việc cung cấp toàn bộ các thông tin của bệnh nhân trong thời điểm thực tại là cần thiết để phân tích dự đoán được chính xác hơn.

#### 3.2. Phát hiện sớm các biến chứng: vai trò của cảm biến và theo dõi liên tục

Các biến chứng sau phẫu thuật như tổn thương cơ tim, suy thận cấp, suy hô hấp do opioid và nhiễm trùng, là nguyên nhân hàng đầu làm tăng chi phí điều trị. Việc phát hiện sớm giúp điều trị kịp thời làm giảm các kết quả xấu cho người bệnh. Các cảm biến mới và theo dõi liên tục giúp thu thập lượng lớn dữ liệu về sinh lý bệnh và hồ sơ sức khỏe điện tử. AI giúp xây dựng các thuật toán dự đoán và hệ thống hỗ trợ quyết định. Ví dụ như hạ huyết áp chu phẫu có

liên quan mật thiết đến tổn thương hệ thống cơ quan. Việc theo dõi huyết áp động mạch không xâm lấn liên tục bởi các cảm biến mới không xâm lấn, cho phép chúng ta xây dựng một thuật toán dự đoán các sự kiện hạ huyết áp, cảnh báo các bác sĩ lâm sàng can thiệp, do đó giảm tỷ lệ hạ huyết áp [10]. Tương tự, có tới một phần ba bệnh nhân bị suy thận cấp sau mổ tim. Một mô hình học máy phân loại dựa trên thuật toán tăng cường theo dõi liên tục độ chính xác cao của áp lực ổ bụng, lượng nước tiểu và nhiệt độ trung tâm đã dự đoán chính xác suy thận cấp giai đoạn 2 trước 24 phút trước lần đầu tiên xuất hiện bệnh thận: các tiêu chí ngưỡng của cải thiện bệnh thận toàn cầu (KDIGO) [11]. Một lần nữa, việc điều chỉnh sớm áp lực tưới máu kết hợp với thuốc vận mạch, thể tích dịch và lợi tiểu làm giảm các kết quả bất lợi. Suy hô hấp do opioid gây ra là biến chứng thường gặp ở hậu phẫu. Giờ đây, bằng các sản phẩm công nghệ đeo được trên người bệnh giúp theo dõi liên tục tốt hơn, đã cho phép phát hiện sớm các cơn suy hô hấp. Các điểm số dự đoán suy hô hấp do Opioid ở bệnh nhân được theo dõi bằng Capnography (PRODIGY) là bước đầu tiên trong việc dự đoán nguy cơ suy hô hấp bằng cách sử dụng mô hình hồi quy đa biến trên dữ liệu đo oxy và CO<sub>2</sub> liên tục [12].

### 3.3. Điều trị kịp thời và hiệu quả: hệ thống hỗ trợ quyết định

Hệ thống hỗ trợ quyết định có thể đồng hóa thông tin bệnh nhân và các chứng cứ dữ liệu y khoa khác để tạo ra hướng dẫn tại thời điểm cần điều trị. Ví dụ, Joosten và cộng sự đã sử dụng ba hệ thống vòng kín để chuẩn độ chính xác thuốc gây mê, giảm đau và dịch truyền, kết quả cho thấy phục hồi nhận thức ở bệnh nhân tốt hơn phương pháp kiểm soát bằng thủ công [13]. Khi bác sĩ gây mê hồi sức không có các thông tin lâm sàng, cận lâm sàng tối ưu nhất của người bệnh, AI không chỉ giúp xây dựng các hướng dẫn và khuyến cáo của các hiệp hội chuyên môn khác nhau mà còn có thể giúp xây dựng các hệ thống hỗ trợ quyết định dựa trên các hướng dẫn đó.

## 4. Các ứng dụng của AI trong phẫu thuật

Ứng dụng AI và phân tích dự đoán trong phòng mổ thường quy giúp các bệnh viện giải quyết những thiếu sót, thách thức lâm sàng mà bác sĩ gặp phải khi thực hiện phẫu thuật với sự hỗ trợ của các công cụ hỗ trợ quyết định và dẫn đường dựa trên hình ảnh. Điều này giúp các bác sĩ phẫu thuật thực hiện tốt hơn công việc của họ. Bệnh nhân là người hưởng lợi cuối cùng từ các giải pháp này. Một số giải pháp AI có thể giúp xác định nguy cơ biến chứng ngay trước khi bệnh nhân được đưa vào phòng mổ, nhờ đó các bác sĩ chủ động ngăn ngừa, đảm bảo ca mổ diễn ra thuận lợi, phục hồi sớm, ít biến chứng, giảm mổ lại và cuối cùng giúp giảm viện phí.

AI cũng đã giúp xác định các lĩnh vực cần nhắm tới để cải thiện chất lượng phẫu thuật. Một số bệnh viện sử dụng hệ thống gọi là Black box (hộp đen phòng mổ) để theo dõi tất cả các hoạt động trong phòng mổ, bao gồm các dấu hiệu quan trọng của bệnh nhân, trực trực thiết bị và hiệu suất của đội phẫu thuật, hầu như bất kỳ yếu tố nào có thể ảnh hưởng đến kết quả của một phẫu thuật. Các luồng dữ liệu được thu thập bởi nền tảng này sau đó được phân tích bằng cách sử dụng kết hợp trí tuệ nhân tạo và các nhà phân tích được đào tạo chuyên môn để tạo ra phản hồi nhằm nâng cao hiệu quả trong phòng mổ, tăng cường đào tạo phẫu thuật và tối ưu hóa các phương pháp phẫu thuật tốt nhất. Một bệnh viện sử dụng Black box này đã phát hiện cửa phòng mổ được mở quá thường xuyên trong quá trình phẫu thuật. Cuộc thảo luận sau đó với ban quản lý phòng mổ cho thấy giờ đựng chỉ phẫu thuật đã bị chuyển ra bên ngoài phòng nên nó đã được trả về vị trí ban đầu trong phòng mổ. Các phòng mổ là nơi có môi trường rất phức tạp trong đó việc số hóa môi trường phòng mổ, thông tin kỹ thuật số đến từ các hệ thống thông tin khác nhau, các thiết bị điện tử, các cảm biến có thể được sử dụng để phát triển một hệ thống AI mà nó có thể hiểu được các quá trình phẫu thuật. Ví dụ như hệ thống Triton sử dụng công nghệ AI và camera

hồng ngoại để phân tích hình ảnh chụp bằng iPad các miếng gạc phẫu thuật trong phòng mổ để định lượng máu mất một cách chính xác. Đây là phương pháp theo dõi lượng máu mất trong thời gian thực tế trong mổ với ứng dụng mới của máy tính bảng và AI [14].

### 5. Các ứng dụng của AI trong cải thiện chất lượng điều trị và chăm sóc

Trong giai đoạn chu phẫu, bệnh nhân trải qua nhiều can thiệp điều trị khác nhau với các mức độ phức tạp khác nhau, nhưng bất chấp sự tiến bộ của y học, các biến chứng vẫn thường gặp và đôi khi gây tử vong. Các bác sĩ lâm sàng thu thập thông tin để đánh giá tình trạng nền của bệnh nhân và các rủi ro liên quan bằng cách hỏi tiền sử chi tiết, khám lâm sàng và các xét nghiệm cận lâm sàng. Sau đó, các bác sĩ lâm sàng sẽ tạo ra một kế hoạch điều trị và theo dõi cụ thể để đạt được kết quả tốt nhất. Tuy nhiên, hầu hết việc ra quyết định đều dựa trên kiến thức có được thông qua kinh nghiệm trước đó. Lượng lớn dữ liệu chăm sóc sức khỏe có sẵn từ hồ sơ sức khỏe điện tử đã khiến các kỹ thuật AI trở thành một đề xuất rất hấp dẫn để hỗ trợ ra quyết định lâm sàng, cải thiện chất lượng và an toàn. AI không chỉ có thể giúp đưa ra các quyết định thường xuyên mà còn có thể chủ động xác định các tác hại tiềm ẩn. Ví dụ, việc trùng lặp các xét nghiệm, kê đơn xét nghiệm hoặc thuốc không cần thiết và đưa ra một kế hoạch điều trị không tối ưu là điều thường thấy.

Do đó, AI có thể giúp mang lại chất lượng tốt hơn bằng cách: (1) cung cấp thông tin liên quan về bệnh nhân phẫu thuật cho các bác sĩ tại các thời điểm ra quyết định quan trọng, (2) hỗ trợ xây dựng kế hoạch điều trị và chăm sóc cá nhân hóa dựa trên tình trạng bệnh và nhu cầu của bệnh nhân, (3) theo dõi việc tuân thủ các thực hành y học dựa trên bằng chứng.

Trí tuệ nhân tạo có thể giúp phát hiện những khác biệt tinh tế trong các nhóm bệnh nhân phẫu thuật và khám phá ra các thực hành liên quan đến kết quả tốt nhất và xấu nhất. Từ đó, các bác sĩ

lâm sàng có khả năng thiết kế các lộ trình phẫu thuật tối ưu nhất cho bệnh nhân dựa trên các đặc điểm nền của bệnh nhân, quy trình phẫu thuật và quá trình phục hồi. Trong giai đoạn phẫu thuật, bệnh nhân thường phát triển các biến chứng, phần lớn trong số đó có thể tránh được nếu các biện pháp can thiệp được thực hiện kịp thời. Lundberg và đồng nghiệp đã chứng minh rằng một thuật toán trí tuệ nhân tạo có thể dự đoán tình trạng thiếu oxy trong phẫu thuật trong vòng 5 phút trước khi nó xảy ra. Thuật toán cũng xác định các yếu tố dự đoán quan trọng, giúp các bác sĩ lập kế hoạch quản lý thích hợp [15].

### 6. Kết luận

Những tiến bộ trong lĩnh vực trí tuệ nhân tạo đã cho phép phát triển các mô hình dự đoán chính xác bằng cách sử dụng dữ liệu lớn về lâm sàng. Việc sử dụng dụng trí tuệ nhân tạo trong lĩnh vực gây mê và phẫu thuật nhằm cung cấp sự an toàn, kịp thời và hiệu quả cho bệnh nhân trong thời gian chu phẫu. Hiện tại, AI trong y học vẫn là một công cụ và vẫn còn là một công cụ thô sơ. Một công cụ vẫn chưa thể vượt qua được một bác sĩ lâm sàng khôn ngoan, được đào tạo, mài giũa bằng kinh nghiệm và có thể hình thành mối quan hệ với bệnh nhân và cung cấp cho họ dịch vụ điều trị chăm sóc thích hợp.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Watters D.A, Hollands M.J, Gruen R.L. et al. (2015). "Perioperative mortality rate (pomr): a global indicator of access to safe surgery and anaesthesia". *World J Surg.* 39, 856-864. DOI: 10.1007/s00268-014-2638-4.
- [2] R.M. Pearse et al. (2012). "Mortality after surgery in Europe: a 7-day cohort study" *The Lancet.* Pages 1059-1065.
- [3] Simpao AF, Ahumada LM, Rehman MA. (2015). "Big data and visual analytics in anaesthesia and health care". *Br J Anaesth.* 115, 350-356. DOI: 10.1093/bja/aeu552.
- [4] Hatib F, Jian Z, Buddi S. (2018). "Machine-learning algorithm to predict hypotension based on high-fidelity arterial pressure waveform analysis". *Anesthesiology.* 129, 663-674. DOI: 10.1097/ALN0000000000002300.

- [5] Ghorbani A, Ouyang D, Abid A. (2020). “Deep learning interpretation of echocardiograms”. *NPJ Digit Med.* 3, 10.
- [6] Xu K, Lam M, Pang J, et al. (2019). Multimodal machine learning for automated ICD coding. Proceedings of the 4th Machine Learning for Healthcare Conference 2019.
- [7] Meijer FS, Martini CH, Broens S. (2019). “Nociception-guided versus standard care during remifentanyl-propofol anesthesia: a randomized controlled trial”. *Anesthesiology.* 130, 745–755. DOI: 10.1097/ALN.0000000000002634.
- [8] Le Manach Y, Collins G, Rodseth R. (2016). “Preoperative score to predict postoperative mortality (POSPOM): derivation and validation”. *Anesthesiology.* 124, 570–579. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000000972>.
- [9] Khanna AK, Shaw AD, Stapelfeldt WH. (2021). “Postoperative hypotension and adverse clinical outcomes in patients without intraoperative hypotension, after noncardiac surgery”. *Anesth Analg.* 132(5), 1410–1420. DOI: 10.1213/ANE.0000000000005374.
- [10] Maheshwari K, Buddi S, Jian Z. (2020). “Performance of the Hypotension Prediction Index with non-invasive arterial pressure waveforms in non-cardiac surgical patients”. *J Clin Monit Comput.* 35, 71–78. DOI: 10.1007/s10877-020-00463-5.
- [11] Prabhakar A, Stanton K, Burnett D, et al. (2021). “1130: combining urine output and intra-abdominal pressures predict acute kidney injury early”. *Crit Care Med.* 49, 567. DOI: 10.1097/01.ccm.0000730408.55242.7c.
- [12] Khanna AK, Bergese SD, Jungquist CR, et al. (2020). “Prediction of Opioid-induced respiratory Depression In patients monitored by capnoGraphY (PRODIGY) Group Collaborators. Prediction of opioid-induced respiratory depression on inpatient wards using continuous capnography and oximetry: an international prospective, observational trial”. *Anesth Analg.* 131, 1012–1024. DOI: 10.1213/ANE.0000000000004788.
- [13] Lundberg SM, Nair B, Vavilala MS. (2018). “Explainable machine-learning predictions for the prevention of hypoxaemia during surgery”. *Nat Biomed Eng.* 2, 749–760. DOI: 10.1038/s41551-018-0304-0.
- [14] Katz D, Wang R, O’Neil L. (2020). “The association between the introduction of quantitative assessment of postpartum blood loss and institutional changes in clinical practice: an observational study”. *Int J Obstet Anesth.* 42, 4–10. DOI: 10.1016/j.ijoa.2019.05.006.
- [15] Lundberg SM, Nair B, Vavilala MS. (2018). “Explainable machine-learning predictions for the prevention of hypoxaemia during surgery”. *Nat Biomed Eng.* 2, 749–760. DOI: 10.1038/s41551-018-0304-0.