

Машинное обучение с использованием ультразвуковых показателей в прогнозировании интраоперационной гипотензии при робот-ассистированной радикальной простатэктомии

В. С. Андреенков¹, А. В. Власенко^{1,2}, А. Н. Корниенко¹, А. С. Казаков¹, Е. П. Родионов^{1,2}, К. Б. Колонтарев¹, Е. А. Евдокимов²

¹ Центр анестезиологии и реаниматологии ГБУЗ города Москвы «Московский многопрофильный научно-клинический центр имени С.П. Боткина Департамента здравоохранения города Москвы», Москва, Россия

² Кафедра анестезиологии, реаниматологии и неотложной медицины ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, Москва, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Робот-ассистированная радикальная простатэктомия является одним из ведущих методов лечения рака предстательной железы. Частым осложнением общей анестезии при этой операции является интраоперационная гипотензия. В последние годы набирает популярность применение предоперационного ультразвукового обследования для прогнозирования этого состояния и проведения его персонализированной профилактики. Точность прогноза ультразвукового обследования возможно повысить за счет использования дополнительных предикторов, объединенных методами машинного обучения.

Цель исследования. Улучшить результаты лечения пациентов с раком предстательной железы путем оптимизации их волемического статуса в периоперационном периоде перед робот-ассистированной простатэктомией.

Материалы и методы. В проспективное исследование было включено 64 пациента, планирующих к проведению робот-ассистированной радикальной простатэктомии. Перед проведением операции пациентам было выполнено прикроватное ультразвуковое исследование с определением диаметров и индексов коллабируемости нижней полой и подключичной вен, скорректированного времени систолического потока (сCFT) и вариабельности пикового систолического потока (ΔV) на сонной артерии. Эти данные были использованы для построения прогностических моделей машинного обучения с целью более эффективного предсказания развития интраоперационной гипотензии.

Результаты. Наибольшей прогностической ценностью обладал показатель вариабельности пикового систолического потока на сонной артерии (AUROC 0,843, безошибочность 75%). Оптимальным пороговым значением этого показателя для предсказания интраоперационной гипотензии было 8,33%. Создание модели машинного обучения на основе градиентного бустинга с использованием дополнительных предикторов позволило увеличить точность прогноза (AUROC 0,933, безошибочность 95%).

Выводы. Определение вариабельности пикового систолического потока на сонной артерии является наиболее прогностически ценным показателем для предсказания интраоперационной гипотензии при робот-ассистированной радикальной простатэктомии. Использование методов машинного обучения для прогнозирования интраоперационной гипотензии позволяет увеличить точность предсказания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интраоперационная гипотензия, робот-ассистированная радикальная простатэктомия, машинное обучение, ультразвуковое исследование.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Machine learning with ultrasound examination for prediction of intraoperative hypotension during robot-assisted radical prostatectomy

V. S. Andreenkov¹, A. V. Vlasenko^{1,2}, A. N. Kornienko¹, A. S. Kazakov¹, E. P. Rodionov^{1,2}, K. B. Kolontarev¹, E. A. Evdokimov²

¹ Botkin Hospital, Moscow, Russia

² Russian Medical Academy for Continuing Professional Education, Moscow, Russia

SUMMARY

Introduction. Robot-assisted radical prostatectomy is one of the leading methods of prostate cancer treatment. A common complication of general anesthesia during this operation is intraoperative hypotension. In recent years, the use of preoperative ultrasound examinations to predict this condition and carry out personalized prevention has been gaining popularity. Machine learning methods trained with additional predictors can improve the accuracy of these predictions.

Objective. To improve the treatment outcomes of patients with prostate cancer by optimizing their volemic status in the perioperative period before robot-assisted prostatectomy.

Materials and methods. The prospective study included 64 patients scheduled for robot-assisted radical prostatectomy. Before surgery, patients underwent bedside ultrasound examination to determine the diameters and collapsibility indices of the inferior vena cava and subclavian veins, corrected carotid flow time (сCFT), and respiratory variation of blood flow peak velocity (ΔV). These data were used in the training of machine learning predictive models to ameliorate intraoperative hypotension prediction efficacy.

Results. The respiratory variation of blood flow peak velocity had the highest predictive value (AUROC 0.843, accuracy 75%). The indicator's optimal threshold for intraoperative hypotension prediction was 8.33%. The accuracy of the prediction has been increased using the machine learning model based on gradient boosting with additional predictors (AUROC 0.933, accuracy 95%).

Conclusions. Determining the respiratory variation of blood flow peak velocity is the most prognostically valuable indicator for intraoperative hypotension prediction during robot-assisted radical prostatectomy. The use of machine learning methods to predict intraoperative hypotension increases the accuracy of prediction.

KEYWORDS: intraoperative hypotension, robot-assisted radical prostatectomy, machine learning, ultrasound examination.

CONFLICT OF INTEREST. The authors declare no conflict of interest.

Список сокращений

АД – артериальное давление
ИМТ – индекс массы тела
ИОГ – интраоперационная гипотензия
МО – машинное обучение
НПВ – нижняя полая вена
ПКВ – подключичная вена
РРПЭ – робот-ассистированная радикальная простатэктомия
ANOVA – однофакторный дисперсионный анализ
AUROC – площадь под кривой ошибок
AUPRC – площадь под кривой точности-полноты
сCFT – скорректированное время систолического потока на сонной артерии
POCUS – прикроватное ультразвуковое исследование

ΔV – вариабельность пикового систолического потока на сонной артерии
IVCCI – индекс коллабироваия нижней полой вены
SCVCI – индекс коллабироваия подключичной вены
сCFT_{PLR} – скорректированное время систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног
 ΔV _{PLR} – вариабельность пикового систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног
 $\Delta(\Delta V)$ _{PLR} – индекс снижения вариабельности пикового систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног

Введение

Поддержание стабильности кардиогемодинамических показателей является одной из важнейших задач врача-анестезиолога в периоперационном периоде. Их нарушения могут выражаться в виде интраоперационного гипертонического криза или неконтролируемой интраоперационной гипотензии (ИОГ). Последнее состояние представляет для пациента высокую опасность в связи с развитием гипоперфузии органов, приводящей к их недостаточности в послеоперационном периоде [1–3]. Из ряда исследований известно, что у пациентов, перенесших эпизод ИОГ, увеличивается время нахождения в стационаре [4] и повышается госпитальная летальность [3, 5]. В связи с этим ИОГ является актуальной проблемой анестезиологии-реаниматологии.

Согласно ряду работ, даже кратковременный эпизод снижения артериального давления (АД) может привести к осложнениям в послеоперационном периоде [6]. В связи с этим в последние годы набирает популярность изучение способов прогнозирования развития ИОГ, которые позволят оптимизировать кардиогемодинамические показатели до операции и, таким образом, сократить длительность гипоперфузии органов. В качестве предикторов появления эпизодов снижения АД во время операции предложены демографические, антропометрические, физиологические, лабораторные и инструментальные данные [5, 7–10]. Учитывая важную роль волемического статуса в развитии ИОГ все чаще для предсказания этого события применяется прикроватное ультразвуковое исследование (POCUS), позволяющее получить достаточно точный и ранний прогноз снижения АД. Этот метод привлекает исследователей и практических врачей своей неинвазивностью, отсутствием необходимости в специализированном оборудовании и минимальными затратами на обучение медицинского персонала его использованию.

Искусственный интеллект все чаще находит применение для решения как научных, так и практических проблем анестезиологии [11–13]. Одним из наиболее часто используемых подклассов этой области является машинное обучение (МО) – изучение и применение самообучающихся

алгоритмов для решения задач без прямого программирования. МО в последние годы активно применяют и при прогнозировании ИОГ [14–18].

Робот-ассистированная радикальная простатэктомия (РРПЭ) является одним из наиболее современных радикальных методов лечения рака предстательной железы. Этот метод совмещает в себе минимальную инвазивность и краткие сроки реабилитации. Однако анестезиологическое пособие при этой операции связано с рядом осложнений, одним из которых является ИОГ. В связи с этим исследование способов прогнозирования ИОГ у когорты пациентов с планируемой РРПЭ представляется актуальным.

Цель исследования

Улучшить результаты лечения пациентов с раком предстательной железы путем оптимизации их волемического статуса в периоперационном периоде перед робот-ассистированной простатэктомией.

Материалы и методы

Проспективное когортное исследование проводили на базе Центра анестезиологии и реаниматологии и Московского урологического центра ГБУЗ ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ. Оценку объема необходимой выборки проводили с использованием бесплатного программного обеспечения easyROC. Характеристиками исследования были выбраны: $\alpha=0,05$, $1-\beta=0,8$. Исходя из ранее проведенных подобных исследований, ожидаемая площадь под кривой ошибок (AUROC) составляла не менее 0,7, а вероятность положительного исхода (гипотензии) – около 30% [19–21]. Результирующим показателем стал необходимый объем выборки в 64 пациента. С учетом возможного исключения пациентов в ходе исследования объем выборки был расширен до 70 пациентов, которые были включены в исследование в период с ноября 2024 г. по июнь 2025 г. Из включенных пациентов один был исключен в связи с гипотензией в предоперационном периоде, двое были исключены в связи с выявленным стенозом сонных артерий по данным медицинской документации, трое исключены в связи с отменой операции.

Критерии включения

Планируемое оперативное лечение в объеме робот-ассистированной простатэктомии.

Физический статус по классификации Американского общества анестезиологов (ASA) 1–3-го класса.

Подписание добровольного информированного согласия на участие в исследовании.

Критерии не включения

1. Хроническая сердечная недостаточность с фракцией выброса менее 40 %.
2. Перегрузка правого желудочка в результате легочной гипертензии.
3. Наличие протезированных клапанов сердца.
4. Тяжелая недостаточность клапанов сердца.
5. Стеноз сонных артерий более 50 %.
6. Перенесенные операции на сонных артериях.
7. Наличие искусственного водителя ритма.

Критерии исключения

1. Отказ от участия в исследовании на любом этапе.
2. Техническая невозможность в ходе предоперационного эхокардиографического обследования собрать ключевые сведения о показателях гемодинамики пациента (отсутствие ультразвукового окна, анатомические особенности пациента и др.).
3. Гипотензия (систолическое АД менее 90 мм рт. ст. или среднее АД менее 65 мм рт. ст.) в предоперационном периоде.
4. Отмена или перенос операции.

После включения в исследование и подписания информированного согласия производили сбор демографических (возраст), антропометрических (рост, масса тела, индекс массы тела [ИМТ]), анамнестических (наличие или отсутствие в анамнезе гипертонической болезни, ишемической болезни сердца, хронической обструктивной болезни легких, сахарного диабета) и лабораторных (концентрация гемоглобина, показатель гематокрита и концентрация

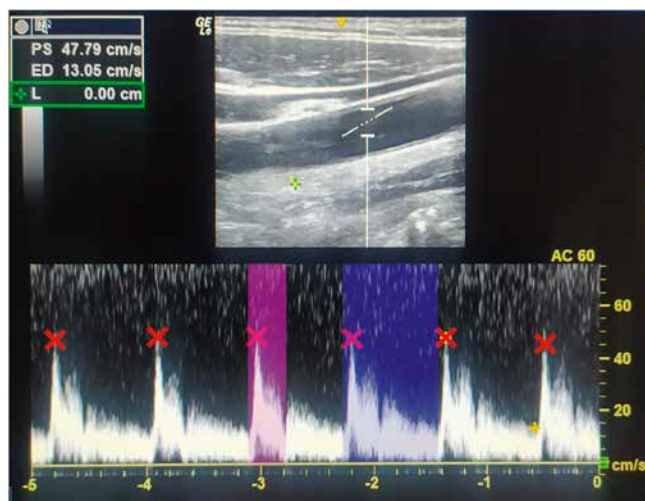


Рисунок 1. Допплерограмма потока на сонной артерии. Фиолетовым указано измерение времени систолического потока одного из сердечных циклов, синим – общее время одного из сердечных циклов

креатинина до операции) данных о пациенте. За 1–2 ч до операции всем пациентам предлагали пройти обследование в объеме модифицированного POCUS. В это исследование входило определение показателей: диаметр и индекс коллабируемости нижней полой (НПВ) и подключичной (ПКВ) вен, скорректированное время систолического потока (сCFT) и вариабельность пикового систолического потока (ΔV) на сонной артерии. Последние два показателя измеряли с использованием динамического теста с пассивным подъемом ног (которые обозначены далее как сCFTR и ΔVR соответственно для сCFT и ΔV).

Все измерения проводились с использованием аппарата GE Logiq E в комплекте с линейным датчиком 12L, конвексным датчиком C 1–5. сCFT и ΔV определяли согласно общепринятой методике. Линейный датчик располагали на уровне нижнего края щитовидного хряща маркером датчика в сторону головы пациента, получая при этом изображение правой общей сонной артерии в В-режиме. В режиме импульсно-волновой доплерографии контрольный объем располагали в центр просвета сосуда, на 2 см проксимальнее бифуркации общей сонной артерии, выполняли коррекцию угла наклона. Получали трассировку потока в общей сонной артерии в течение одного респираторного цикла пациента (соответствовало 4–5 сердечным циклам, *рис. 1*). В каждом цикле определяли время систолического потока (время от начала систолического потока до диастолической вырезки) и время сердечного цикла (время между началами систолического потока последовательных циклов). Среди циклов одной респираторной фазы определяли максимальный и минимальный пиковый систолический потоки. В дальнейшем для вычисления параметров использовали среднее значение четырех последовательных сердечных циклов. Значения сCFT и ΔV вычисляли по формулам:

$$сCFT = \frac{Tf}{\sqrt{Tc}},$$

где Tf – время систолического потока, Tc – время сердечного цикла;

$$\Delta V = \frac{(V_{max} - V_{min})}{(V_{max} + V_{min})/2} \times 100\%,$$

где Vmax – максимальная скорость потока на сонной артерии, Vmin – минимальная скорость потока на сонной артерии.

Индексы изменения ультразвуковых показателей при пассивном подъеме ног вычисляли по формулам:

$$\Delta сCFT_{PLR} = \frac{сCFT_{PLR} - сCFT}{сCFT},$$

где $\Delta сCFT_{PLR}$ – индекс нарастания сCFT при пассивном подъеме ног, сCFTR – показатель сCFT во время пассивного подъема ног, сCFT – показатель сCFT в покое;

$$\Delta(\Delta V)_{PLR} = \frac{\Delta V - \Delta VR}{\Delta V},$$

где $\Delta(\Delta V)_{PLR}$ – индекс снижения показателя ΔV при пассивном подъеме ног, ΔVR – показатель ΔV во время пассивного подъема ног, ΔV – показатель ΔV в покое.

Диаметр и индекс коллабируемости НПВ определяли в соответствии с рекомендациями Американского общества эхокардиографии [22]. Секторный датчик располагали в эпигастральной области пациента, маркером в сторону головы пациента и под наклоном в 45 градусов к передней брюшной стенке пациента. Путем изменения угла наклона датчика и его положения на передней брюшной стенке определяли положение НПВ и визуализировали место ее впадения в правое предсердие. На расстоянии 2 см каудальнее от этого места измеряли диаметр НПВ. Для визуализации ПКВ линейный датчик устанавливали под правую ключицу медиальнее среднеключичной линии маркером вверх. После нахождения ПКВ включали М-режим (рис. 2). Для оценки индекса коллабируемости НПВ и ПКВ пациенты были проинструктированы сделать плавный глубокий вдох и затем плавный выдох. Вычисляли максимальный и минимальный диаметры сосудов. Индекс коллабируемости НПВ (IVCCI) и индекс коллабируемости ПКВ (SCVCI) определяли по формулам:

$$IVCCI = \frac{DIVC - dIVC}{DIVC} \times 100\%,$$

где DIVC – максимальный диаметр НПВ во время форсированного вдоха, dIVC – минимальный диаметр НПВ во время форсированного вдоха;

$$SCVCI = \frac{DSCV - dSCV}{DSCV} \times 100\%,$$

где DSCV – максимальный диаметр ПКВ во время форсированного вдоха, dSCV – минимальный диаметр ПКВ во время форсированного вдоха.

После доставки пациента в операционную проводили первое измерение артериального давления и пульса, регистрировали время от проведения POCUS до индукции анестезии. Индукцию анестезии проводили пропофолом в качестве гипнотического компонента, рокурнием в качестве миорелаксирующего компонента, фентанилом в качестве адъювантного препарата. Дозы препаратов были подобраны согласно инструкциям к их применению. Регистрацию витальных показателей (систолического, диастолического, среднего АД, пульса, комплаенса легких, пикового давления) проводили каждые 3 мин на протяжении первых 15 мин после индукции анестезии. По окончании операции регистрировали объем проведенной инфузии, объем кровопотери, общее время операции.

В качестве положительного исхода для задач прогнозирования принимали наличие ранней ИОГ. Учитывая крайне высокую гетерогенность в дефинициях этого явления, нами было принято решение об использовании одного из самых частых критериев – снижение среднего АД до 65 мм рт. ст., по меньшей мере, в одном измерении. Это определение согласуется с таковым из последних консенсусных решений [23]. В зависимости от наличия или отсутствия указанного события пациенты были разделены на две группы: группа А – с наличием гипотензии во время индукции общей анестезии, и группа В – пациенты с нормальным АД во время индукции общей анестезии.

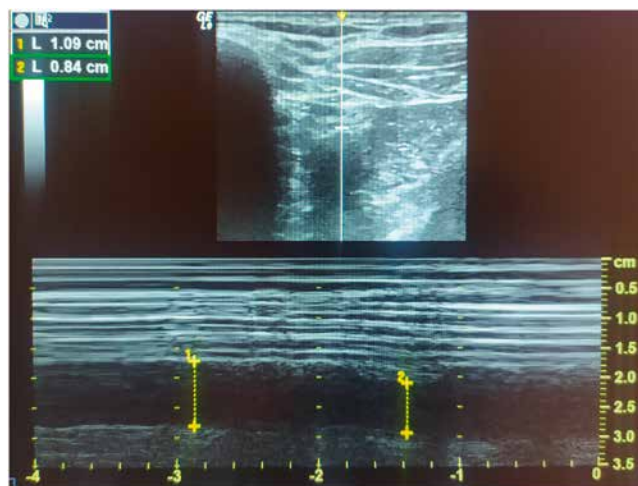


Рисунок 2. Ультрасонограмма подключичной вены. Маркерами указаны измерения диаметров подключичной вены во время разных фаз дыхательного цикла

Статистический анализ полученных данных проводили при помощи пакета программ SPSS Statistics 27 (IBM, Armonk, NY, США). Нормальность распределения данных проверяли с использованием критерия Колмогорова–Смирнова совместно с критерием Лиллиефорса. Данные, распределение которых было близко к нормальному, описывали как «среднее значение ± стандартное отклонение». Данные, распределение которых было отлично от нормального, описывали как «медиана [интерквартильный размах]». Оценку значимости отличий между группами проводили с использованием непараметрических (U-критерий Манна – Уитни) и параметрических (критерий Стьюдента) критериев. Для сравнения категориальных переменных применяли критерий χ^2 или точный тест Фишера. Для анализа повторяющихся измерений применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Для оценки влияния переменных на исход производили одномерный (univariable) логистический регрессионный анализ. Переменные, оказывающие значительное влияние на исход ($p < 0,25$), были оценены при помощи многомерной (multivariable) логистической регрессии. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

После определения прогностической значимости наиболее ценные показатели использовались для построения моделей МО. Построение предиктивных моделей проводили при помощи написанной нами программы на языке Python 3.13.3 (Python Software Foundation, Wilmington, DE, USA). При разработке программы использованы библиотеки: numpy, pandas, scikit-learn, xgboost, matplotlib, pickle. Согласно данным ранее проведенных исследований, наибольшую ценность для предсказания ИОГ могут иметь прогностические модели, построенные с использованием методов деревьев принятия решений (с применением ансамблевых алгоритмов градиентного бустинга, адаптивного бустинга или случайного леса), машины опорных векторов, логистической регрессии или искусственных нейронных сетей [18]. Деревья принятия решений – метод МО, заключающийся в построении древовидных схем на основе ранее полученных данных, позволяющих проводить прогноз событий при помощи

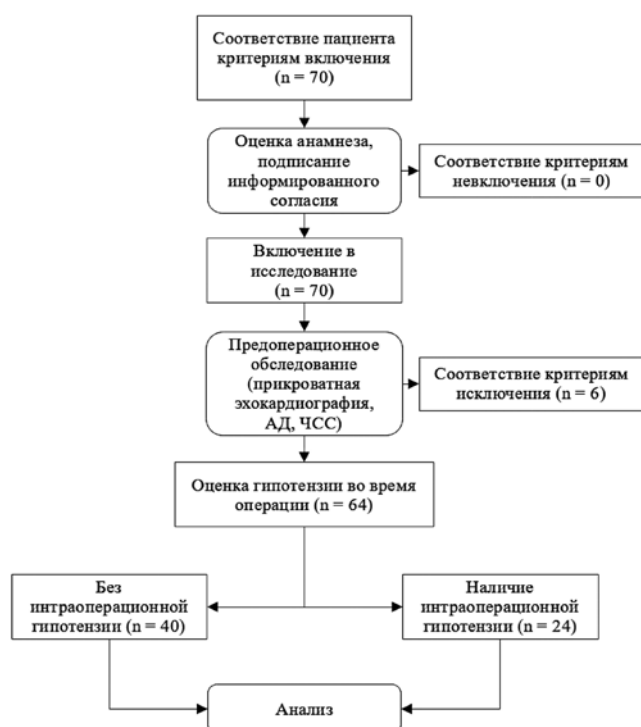


Рисунок 3. Диаграмма CONSORT исследования

Таблица 1
Характеристика пациентов в группах А и В

Показатель	Группа А (гипотензия)	Группа В (нормотензия)	Р
Возраст, лет	64,04±8,27	65,6±6,49	0,404
Рост, см	176,83±7,82	176,25±6,99	0,758
Вес, кг	85 [73,25–94]	84,5 [77,25–94,75]	0,744
ИМТ	28,25 [23,63–29]	27 [25,65–30]	0,781
Гемоглобин до операции, г/л	151,5 [148–156]	153 [148,25–157]	0,355
Гематокрит до операции, г/л	44,91 [44,53–45,73]	45,84 [44,69–46,38]	0,106
Креатинин до операции, мкмоль/л	91,1 [88–95,06]	94,71 [87,45–98,78]	0,252
Гемоглобин после операции, г/л	143,5 [138,25–147,75]	144,5 [138–150,75]	0,532
Гематокрит после операции, г/л	41,55 [40,08–43,28]	42 [39,95–43,8]	0,95
Креатинин после операции, мкмоль/л	101,95 [96,88–113,45]	101,9 [95,25–114]	0,901
САД до операции, мм рт. ст.	126 [120,5–130]	127,5 [122,25–134]	0,408
ДАД до операции, мм рт. ст.	78,5 [72,5–81,5]	77 [74–80]	0,867
срАД до операции, мм рт. ст.	96,5 [91–100]	96 [92,5–101,75]	0,765
ЧСС до операции, уд/мин	64,5 [59,25–71,5]	65 [62,5–70]	0,464
Длительность операции, мин	170,04±18,99	173,33±23,14	0,56
Сопутствующая патология			
ГБ	19 (79,2%)	24 (60%)	0,17
ИБС	7 (29,2%)	9 (22,5%)	0,565
СД II типа	3 (12,5%)	7 (17,5%)	0,731
ХОБЛ	3 (12,5%)	5 (12,5%)	1,0
Оценка анестезиологического риска			
ASA II	4 (16,7%)	14 (35%)	0,155
ASA III	20 (83,3%)	26 (65%)	0,155

Сокращения: ИМТ – индекс массы тела; САД – систолическое артериальное давление; ДАД – диастолическое артериальное давление; срАД – среднее артериальное давление; ЧСС – частота сердечных сокращений; ГБ – гипертоническая болезнь; ИБС – ишемическая болезнь сердца; СД – сахарный диабет; ХОБЛ – хроническая обструктивная болезнь легких.

предикторов. Одно дерево принятия решения, как правило, обладает очень низкой точностью, поэтому для практических задач используется множество отдельно обученных деревьев, объединенных вместе, что называется ансамблем. Часто используемыми видами ансамблей является бустинг – обучение деревьев принятия решений с учетом точности ранее обученных деревьев, и бэггинг – обучение множества деревьев со случайными параметрами и совместным принятием решений. Разновидность последнего для деревьев принятия решений называется случайным лесом. Машины опорных векторов позволяют провести разделение наблюдений с помощью гиперплоскости в координатном пространстве. С учетом размеров выборки качественное обучение искусственных нейронных сетей не представлялось возможным, поэтому не проводилось. Для построения моделей полученный набор данных был случайным образом разделен на тренировочный и тестовый в соотношении 80:20. Определение оптимальных гиперпараметров осуществлялось при помощи поиска по решетке с 10-кратной кросс-валидацией на тренировочном наборе данных. Оценка качества моделей в ходе поиска по решетке осуществлялась показателем безошибочности (ассурагу). Качество построенных моделей оценивали с использованием показателей:

безошибочность (assuragu), точность (precision), полнота (recall), AUROC, площадь под кривой точности-полноты (AUPRC).

Результаты

Из вошедших в исследование пациентов в группу А (пациенты с гипотензией) были распределены 24 человека, в группу В (пациенты без гипотензии) – 40 человек (рис. 3). Частота развития интраоперационной гипотензии в исследовании составила 37,5%. Среди демографических, антропометрических, анамнестических данных статистически значимых различий между группами выявлено не было (табл. 1). Осложнений, связанных с анестезиологическим пособием, у пациентов не зарегистрировано.

Средние кардиогемодинамические показатели у пациентов в первые 15 мин после начала индукции анестезии представлены на рисунке 4. В ходе проведенного повторного ANOVA выявлено значимое отличие в АД между группами во всех временных промежутках, кроме прединдукционного ($p < 0,001$). У пациентов обеих групп после индукции анестезии отмечали снижение АД, однако в группе А гипотензия была более выражена.

Среди инструментальных показателей, определенных в предоперационном периоде, статистически

значимые отличия между группами были выявлены только у ΔV и ΔVR , показатели респираторного и кардиогемодинамического мониторинга во время операции у пациентов разных групп статистически значимо не отличались (табл. 2). Результаты одномерного регрессионного анализа показали значимое влияние на развитие гипотензии только этих показателей (для ΔV отношение шансов (OR) 1,799, 95 % доверительный интервал (95 % CI) 1,314–2,461; для ΔVR OR 1,303, 95 % CI 1,121–1,514). Проведенный многомерный регрессионный анализ показал, что ΔV и ΔVR являются независимыми факторами риска развития ИОГ (табл. 3). ROC-анализ выявил средне-высокую прогностическую ценность этих показателей (для ΔV AUROC 0,843, 95 % CI 0,73–0,956; для ΔVR AUROC 0,783, 95 % CI 0,655–0,912). Оптимальная точка отсечки ΔV , определенная по индексу Youden, составила 8,33 % со специфичностью 75 % и чувствительностью 83 %. В «серой зоне» (значения между точкой отсечки с 90 % чувствительностью и точкой отсечки с 90 % специфичностью) оказались пациенты с ΔV от 5,6 до 9,17 %, количество которых было равно 43,8 % от числа обследованных.

Для обучения моделей МО применяли показатели, имеющие наибольшее влияние на развитие ИОГ, а именно ΔV и ΔVR . В качестве дополнительных предикторов использовали демографические, анамнестические, антропометрические и лабораторные данные пациентов. Предикторы, снижающие точность модели или не влияющие на ее свойства, удалялись. В итоге эмпирически было найдено, что использование в качестве предиктора ИМТ позволяет увеличить точность построенных моделей. Среди обученных с использованием этих трех показателей предсказательных моделей наибольшая точность была выявлена у алгоритмов на основе деревьев принятия решения, при этом наилучший результат был получен с использованием ансамблевого метода градиентного бустинга (AUROC 0,933, AUPRC 0,805, безошибочность 95 %, точность 94 %, полнота 92 %). Учитывая малый объем тестовой выборки (13 пациентов), точное

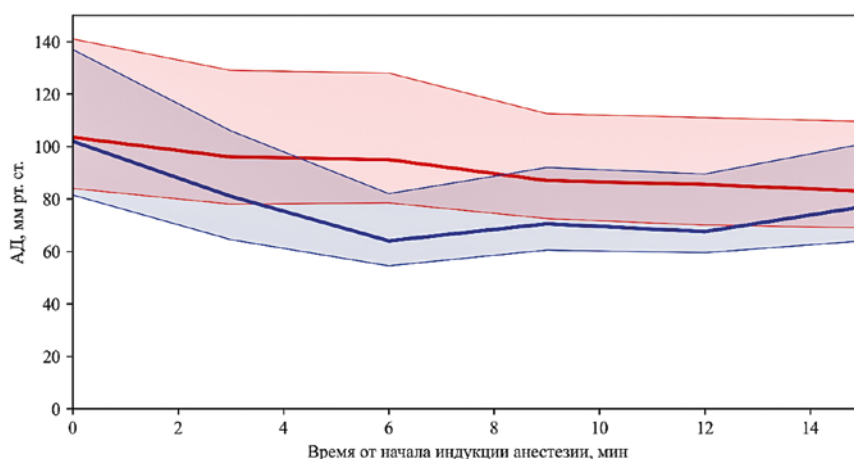


Рисунок 4. Динамика АД во время первых 15 мин после индукции анестезии. Красным обозначена медиана показателей АД у пациентов группы В, синим – у группы А. Тонкие линии обозначают систолическое и диастолическое АД, а толстая линия – среднее АД

Таблица 2
Сравнение предоперационных ультразвуковых показателей и показателей периоперационного мониторинга у пациентов в группах А и В

Показатель	Группа А (гипотензия)	Группа В (нормотензия)	р
Максимальный диаметр НПВ, см	1,52 [1,37–1,63]	1,54 [1,39–1,69]	0,736
Минимальный диаметр НПВ, см	0,86 [0,64–0,9]	0,8 [0,64–0,97]	0,819
IVCCI	0,46 [0,43–0,56]	0,49 [0,43–0,6]	0,604
Максимальный диаметр ПКВ, см	1,09 [1,03–1,16]	0,98 [0,93–1,19]	0,506
Минимальный диаметр ПКВ, см	0,6 [0,48–0,73]	0,6 [0,48–0,75]	0,911
SCVCI	0,44 [0,35–0,56]	0,43 [0,32–0,5]	0,501
cCFT, мс	319,9 [309,9–329,8]	320,3 [313,9–326,6]	0,906
ΔV , %	10,55 [8,55–11,93]	6,88 [4,92–8,55]	<0,001
cCFTR, мс	333,8 [330,4–341,6]	337,3 [332,1–344]	0,417
ΔVR , %	11,38 [9,6–15,33]	6,26 [5,09–10,17]	<0,001
$\Delta cCFT_{PLR}$, %	4,44 [1,91–7,37]	4,7 [3,13–7,76]	0,421
$\Delta(\Delta V)_{PLR}$, %	–14,59 [–38,2]–6,26]	–3,16 [–33,7]–49,15]	0,771
Доза пропофола для индукции анестезии, мг	120 [105–140]	120 [120–150]	0,111
Респираторный комплаенс	86 [78–88]	82 [78–85,75]	0,084
Объем инфузии во время операции, мл	1000 [1000–1200]	1050 [1000–1450]	0,548
Объем кровопотери во время операции, мл	75 [50–100]	100 [50–150]	0,052

Сокращения: IVCCI – индекс коллабироваия нижней полой вены; SCVCI – индекс коллабироваия подключичной вены; cCFT – скорригированное время систолического потока на сонной артерии; ΔV – вариабельность пикового систолического потока на сонной артерии; cCFTR – скорригированное время систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног; ΔVR – вариабельность пикового систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног; $\Delta cCFT_{PLR}$ – индекс нарастания скорригированного времени систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног; $\Delta(\Delta V)_{PLR}$ – индекс снижения вариабельности пикового систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног.

Таблица 3
Одномерный и многомерный логистический регрессионный анализ показателей для прогнозирования ИОГ

Показатель	Одномерная логистическая регрессия			Многомерная логистическая регрессия		
	OR	95 % CI	р	OR	95 % CI	р
Возраст	0,97	0,903–1,041	0,399	–	–	–
ИМТ	0,946	0,798–1,121	0,521	–	–	–
Гемоглобин до операции	0,992	0,921–1,062	0,838	–	–	–
Гематокрит до операции	0,889	0,641–1,232	0,48	–	–	–

Продолжение таблицы 3

IVCCI	0,448	0,005–43,31	0,731	–	–	–
SCVCI	2,08	0,095–45,32	0,641	–	–	–
cCFT	1,0	0,967–1,033	0,978	–	–	–
cCFTR	0,984	0,94–1,03	0,486	–	–	–
ΔV	1,799	1,314–2,461	<0,001	1,631	1,195–2,225	0,002
ΔVR	1,303	1,121–1,514	<0,001	1,227	1,036–1,452	0,018
$\Delta cCFT_{PLR}$	0,972	0,873–1,083	0,609	–	–	–
$\Delta(\Delta V)_{PLR}$	0,999	0,993–1,006	0,84	–	–	–

Сокращения: IVCCI – индекс коллабироваия нижней полой вены; SCVCI – индекс коллабироваия подключичной вены; cCFT – скорригированное время систолического потока на сонной артерии; ΔV – вариабельность пикового систолического потока на сонной артерии; cCFTR – скорригированное время систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног; ΔVR – вариабельность пикового систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног; $\Delta cCFT_{PLR}$ – индекс нарастания скорригированного времени систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног; $\Delta(\Delta V)_{PLR}$ – индекс снижения вариабельности пикового систолического потока на сонной артерии во время пассивного поднятия ног.

определение доверительных интервалов показателей затруднительно, поэтому не применялось. Оптимальные гиперпараметры и показатели предсказательной точности для всех разработанных моделей МО представлены в таблице 4. ROC-кривые моделей представлены на рисунке 5. В этой же таблице для сравнения приведены данные о предсказательных характеристиках ΔV .

Обсуждение

Результаты ранее проведенных исследований, посвященных проблеме прогнозирования ИОГ, имеют очень высокую гетерогенность. Одной из причин этого является включение

Таблица 4
Гиперпараметры и показатели предсказательной точности моделей МО

Модель	Безошибочность, %	Точность, %	Полнота, %	AUROC	AUPRC	Гиперпараметры
ДПР и ГБ	95	94	92	0,933	0,806	'learning_rate': 1, 'max_depth': 2, 'max_leaves': 3, 'n_estimators': 400
ДПР и СЛ	90	91	85	0,9	0,639	'criterion': 'gini', 'max_depth': 3, 'min_samples_split': 4, 'n_estimators': 25
ДПР и АБ	90	91	85	0,867	0,589	'learning_rate': 1, 'n_estimators': 100
МОВ	85	85	85	0,767	0,667	'C': 2, 'gamma': 0,1, 'kernel': 'rbf'
ЛР	85	85	85	0,767	0,667	'C': 0,1, 'max_iter': 100, 'penalty': 'l2', 'solver': 'liblinear'
ΔV с точкой отсечки 8,33%	75	63	83	–	–	–

Сокращения: ДПР – деревья принятия решений; ГБ – градиентный бустинг; СЛ – случайный лес; АБ – адаптивный бустинг; МОВ – машина опорных векторов; ЛР – логистическая регрессия.

в эти исследования пациентов с высокой разницей в демографическом профиле, профиле сопутствующей патологии и виде планируемой операции. В связи с этим появляется необходимость в проведении исследований отдельно при каждом виде оперативного лечения. Однородный профиль пациентов, страдающих раком предстательной железы, делает РППЭ хорошей моделью для изучения прогностических инструментов развития ИОГ.

Ранее был выполнен ряд исследований, касающихся прогнозирования ИОГ при РППЭ. В исследовании Kim и соавт. была изучена возможность использования чреспищеводного доплерографического мониторинга для прогнозирования ИОГ при этой операции [19].

В результате была выявлена средняя предиктивная ценность ряда эхокардиографических показателей. Главным ограничением этого исследования можно считать то, что постановка чреспищеводного ультразвукового датчика производилась уже после индукции анестезии, в результате чего ряд эпизодов ИОГ не был диагностирован. В статье Antonella и соавт. для прогнозирования ИОГ во время РППЭ использован коммерческий алгоритм HPI (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA) [21]. Этот метод имеет высокую точность, однако время от прогноза до эпизода гипотензии при нем составляет около 5 мин, что ограничивает его возможности для профилактики ИОГ [24].

Демографические данные и профиль сопутствующей патологии пациентов в нашем исследовании в целом не отличался от таковых в других исследованиях, касающихся РППЭ [19, 25–27]. Частота развития ИОГ при РППЭ в ранее опубликованных работах составляла от 20 до 62,5% [19–21], что также соответствует полученным нами данным. Высокая вариабельность частоты развития ИОГ при РППЭ связана с различными определениями этого явления. Можно заключить, что использованные нами анестезиологические критерии отбора пациентов для проведения РППЭ не отличаются от общепринятых.

Из графика изменения АД (рис. 4) видно, что по истечении первых 15 мин после индукции анестезии почти у всех пациентов давление возвращалось к допустимым значениям. Из этого можно сделать вывод о том, что наблюдения в течение первых 15 мин достаточно для диагностики ранней ИОГ у большинства пациентов.

В нашем исследовании наибольшую ценность для прогнозирования развития ИОГ имел показатель ΔV . Точка отсечки показателя в целом оказалась соответствующей другим исследованиям ИОГ [28, 29]. Индексы, основанные на применении теста с пассивным подъемом ног, не показали диагностической значимости в нашем исследовании. Вероятно, это связано с минимальной выраженностью волевических нарушений у обследуемой когорты пациентов, в результате чего «аутоинфузия» во время пассивного подъема ног оказывается недостаточной для значимого прироста ударного объема. Вместе с тем использование ΔVR при тренировке моделей МО значительно улучшало их предиктивную способность.

Это может говорить о нелинейной связи между показателями ΔVR и ΔV для прогнозирования ИОГ.

По результатам исследования «серая зона» ΔV включала значимую часть обследованных пациентов, что ограничивает возможность использования этого метода в рутинной практике. Одним из предложенных способов увеличения точности прогноза при ИОГ является применение множества показателей, объединенных методами МО [17]. Отличительной чертой алгоритмов МО является способность построения достоверного прогноза даже в условиях сложного и нелинейного взаимодействия предикторов. Как раз такое взаимодействие патогенетических факторов наблюдается при ИОГ, что делает это состояние одним из перспективных исходов для построения предиктивных моделей МО. В нашем исследовании наибольшая точность прогнозирования ИОГ оказалась у метода градиентного бустинга. Ранее в ряде исследований показана возможность использования градиентного бустинга для прогнозирования ИОГ с использованием предоперационного АД [30], предоперационных лабораторных и демографических данных [31], данных периоперационного мониторинга [31–33]. Статей, посвященных использованию МО для прогнозирования ИОГ и имеющих в качестве предикторов ультразвуковые показатели, нами не найдено.

Ограничением настоящего исследования можно считать объем выборки для построения моделей МО. Небольшой объем данных является характерной чертой проспективных исследований в области МО. В рамках продолжения исследования для выявления точных значений метрик и вычисления доверительных интервалов планируется дополнительный набор пациентов.

Расчет прогноза на основе алгоритмов МО вручную крайне затруднителен, а в ряде случаев невозможен. В связи с этим было принято решение о разработке программного обеспечения для смартфонов, обеспечивающего прогнозирование интраоперационной гипотензии у кровати пациента. Разработанная программа для ЭВМ (смартфона) находится на стадии государственной регистрации.

Выводы

1. Для прогнозирования ИОГ после индукции общей анестезии при РРПЭ возможно использовать ультразвуковые показатели. Наибольшей прогностической ценностью из них обладает ΔV . Оптимальная точка отсечки для прогноза гипотензии – 8,33%. Применение пассивного поднятия ног в нашем исследовании не показало значимой эффективности.
2. Использование методов МО позволяет увеличить точность прогноза благодаря применению в алгоритмах

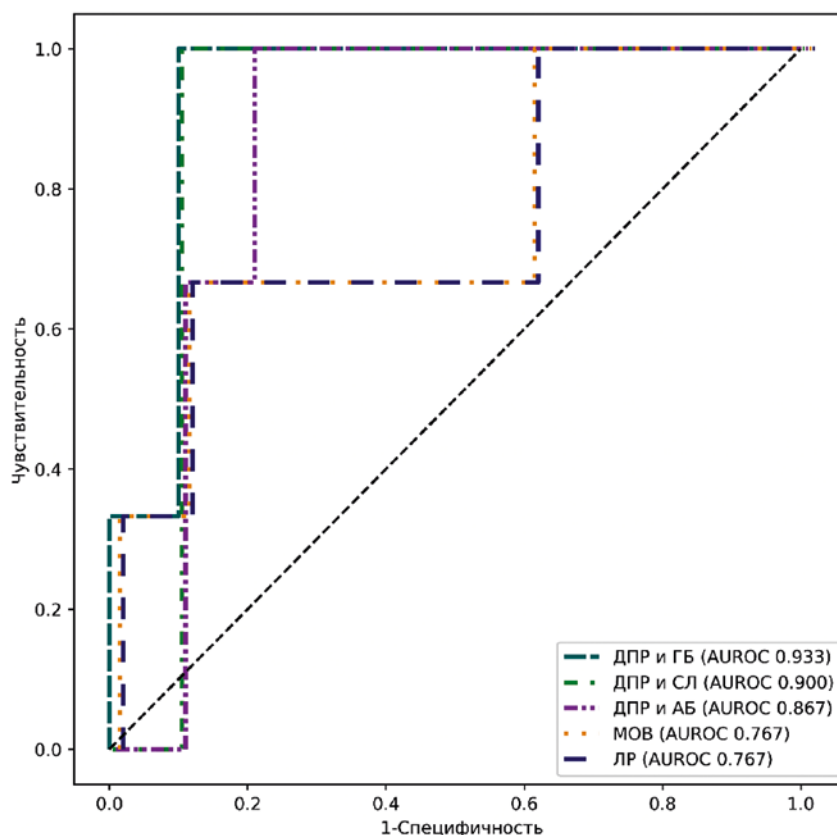


Рисунок 5. ROC-кривые для моделей МО
Сокращения: ДПР – деревья принятия решений; ГБ – градиентный бустинг; СЛ – случайный лес; АБ – адаптивный бустинг; МОВ – машина опорных векторов; ЛР – логистическая регрессия.

дополнительных предикторов. В нашем исследовании наибольшая ценность в качестве дополнительного предиктора обнаружена у ИМТ.

3. Среди алгоритмов МО наиболее эффективным классификатором для методов прогнозирования интраоперационной гипотензии в нашем исследовании являлись деревья принятия решений с использованием градиентного бустинга.

Таким образом, нами показана возможность прогнозирования ИОГ при помощи ультразвукового исследования при РРПЭ. Точность прогноза можно значительно повысить при помощи алгоритмов МО. Полученные данные могут быть применены в рутинной практике врача-анестезиолога для улучшения качества лечения пациентов с раком предстательной железы.

Список литературы / References

1. Леонова Е. А., Мороз Г. Б., Шмырев В. А., Ломиворотов В. В. Интраоперационная гипотензия. Вестник интенсивной терапии имени А. И. Салтанова. 2018; (3): 87–96. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2018-3-87-96>
- Leonova E. A., Moroz G. B., Shmyrev V. A., Lomivorotov V. V. Intraoperative hypotension. Annals of Critical Care. 2018; (3): 87–96. [In Russ.]. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2018-3-87-96>
2. Guarracino F., Bertini P. Perioperative hypotension: causes and remedies. Journal of Anesthesia, Analgesia and Critical Care. 2022; 2 (1): 17. <https://doi.org/10.1186/s44158-022-00045-8>
3. Wijnberge M., Schenk J., Bulle E., Vlaar A. P., Maheshwari K., Hollmann M. W., Binnekade J. M., Geerts B. F., Veelo D. P. Association of intraoperative hypotension with postoperative morbidity and mortality: systematic review and meta-analysis. BJS Open. 2021; 5 (1): zraa018. <https://doi.org/10.1093/bjsopen/zraa018>
4. Tassoudis V., Vretzakis G., Petsiti A., Stamatou G., Bouzia K., Melekos M., Tzavaras G. Impact of intraoperative hypotension on hospital stay in major abdominal surgery. Journal of Anesthesia. 2011; 25 (4): 492–499. <https://doi.org/10.1007/s00540-011-1152-1>
5. Gregory A., Stapelfeldt W. H., Khanna A. K., Smischney N. J., Boero I. J., Chen Q., Stevens M., Shaw A. D. Intraoperative Hypotension Is Associated With Adverse Clinical Outcomes After Noncardiac Surgery. Anesthesia & Analgesia. 2021; 132 (6): 1654–1665. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000005250>

6. Weinberg L, Li S.Y., Louis M., Karp J., Poci N., Carp B.S., Miles L.F., Tully P., Hahn R., Karalipil D., Lee D.-K. Reported definitions of intraoperative hypotension in adults undergoing non-cardiac surgery under general anaesthesia: a review. *BMC Anaesthesiology*. 2022; 22 (1): 69. <https://doi.org/10.1186/s12871-022-01605-9>
7. Kouz K., Hoppe P., Briesenick L., Saugel B. Intraoperative hypotension: Pathophysiology, clinical relevance, and therapeutic approaches. *Indian Journal of Anaesthesia*. 2020; 64 (2): 90–96. https://doi.org/10.4103/ijia.IJA_939_19
8. Temesgen N., Fenta E., Eshetie C., Gelaw M. Early intraoperative hypotension and its associated factors among surgical patients undergoing surgery under general anesthesia: An observational study. *Annals of Medicine and Surgery*. 2021; 71: 102835. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.102835>
9. Mukkamala R., Schnetz M.P., Khanna A.K., Mahajan A. Intraoperative Hypotension Prediction: Current Methods, Controversies, and Research Outlook. *Anesthesia & Analgesia*. 2022; 141 (1): 61–73. <https://doi.org/10.1213/ANE.00000000000007216>
10. Christensen A.L., Jacobs E., Maheshwari K., Xing F., Zhao X., Simon S.E., Domino K.B., Posner K.L., Stewart A.F., Sanford J.A., Sessler D.I. Development and Evaluation of a Risk-Adjusted Measure of Intraoperative Hypotension in Patients Having Nonemergent, Noncardiac Surgery. *Anesthesia & Analgesia*. 2021; 133 (2): 445–454. <https://doi.org/10.1213/ANE.00000000000005287>
11. Maheshwari K., Cywinski J.B., Papay F., Khanna A.K., Mathur P. Artificial Intelligence for Perioperative Medicine: Perioperative Intelligence. *Anesthesia & Analgesia*. 2023; 136 (4): 637–645. <https://doi.org/10.1213/ANE.00000000000005952>
12. Singhal M., Gupta L., Hirani K. A Comprehensive Analysis and Review of Artificial Intelligence in Anaesthesia. *Cureus*. 2023; 15 (9): e45038. <https://doi.org/10.7759/cureus.45038>
13. Varghese C., Harrison E.M., O'Grady G., Topol E.J. Artificial intelligence in surgery. *Nature Medicine*. 2024; 30 (5): 1257–1268. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-02970-3>
14. Hashemi S., Yousefzadeh Z., Abin A.A., Ejlalman A., Nabavi S., Dabbagh A. Machine Learning-Guided Anesthesiology: A Review of Recent Advances and Clinical Applications. *Journal of Cellular & Molecular Anesthesia*. 2024; 9 (1): e145369. <https://doi.org/10.5812/jcma-145369>
15. Kang A.R., Lee J., Jung W., Lee M., Park S.Y., Woo J., Kim S.H. Development of a prediction model for hypotension after induction of anesthesia using machine learning. *PLoS One*. 2020; 15 (4): e0231172. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231172>
16. Kouz K., Brockmann L., Timmermann L.M., Bergholz A., Flick M., Maheshwari K., Sessler D.I., Krause L., Saugel B. Endotypes of intraoperative hypotension during major abdominal surgery: a retrospective machine learning analysis of an observational cohort study. *British Journal of Anaesthesia*. 2023; 130 (3): 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2022.07.056>
17. Zhao A., Elgendy M., Menon C. Machine learning for predicting acute hypotension: A systematic review. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2022; 9. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.937637>
18. Bellini V., Valente M., Bertorelli G., Pifferi B., Craca M., Mordonini M., Lombardo G., Bottani E., Del Rio P., Bignami E. Machine learning in perioperative medicine: a systematic review. *Journal of Anesthesia, Analgesia and Critical Care*. 2022; 2 (1): 2. <https://doi.org/10.1186/s44158-022-00033-y>
19. Kim N.Y., Kim K.J., Kim T.L., Shin H.J., Oh C., Lee M.H., Min J.Y., Kim S.Y. Prediction of hypotension after postural change in robot-assisted laparoscopic prostatectomy using esophageal Doppler monitoring: a prospective observational trial. *Scientific Reports*. 2021; 11 (1): 14589. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93990-3>
20. Park J.-Y., Yu J., Kim C.-S., Baek J.-W., Jo Y., Kim Y.-K. Effect of pneumatic leg compression on post-induction hypotension in elderly patients undergoing robot-assisted laparoscopic prostatectomy: a double-blind randomised controlled trial. *Anaesthesia*. 2023; 76 (6): 730–738. <https://doi.org/10.1111/anae.15994>
21. Antonella C., Disenza A., Rauser M., Matella M., Caggianelli G., Ciaramelletti R., Mirabella L., Cinnella G. Intraoperative hypotension during robotic-assisted radical prostatectomy: A randomised controlled trial comparing standard goal-directed fluid therapy with hypotension prediction index-guided goal-directed fluid therapy. *European Journal of Anaesthesiology*. 2025; 42 (10): 916–923. <https://doi.org/10.1097/EJA.00000000000002211>
22. Lang R.M., Badano L.P., Mor-Avi V., Afila J., Armstrong A., Ernande L., Flachskampf F.A., Foster E., Goldstein S.A., Kuznetsova T., Lancellotti P., Muraru D., Picard M.H., Rietzschel E.R., Rudski L., Spencer K.T., Tsang W., Voigt J.-U. Recommendations for Cardiac Chamber Quantification by Echocardiography in Adults: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *European Heart Journal – Cardiovascular Imaging*. 2015; 16 (3): 233–271. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev014>
23. Saugel B., Fletcher N., Gan T.J., Grocott M.P.W., Myles P.S., Sessler D.I., Auzinger G., Chapell D., Gan T.J., Edwards M., Fletcher N., Forni L.G., Grocott M.P.W., Kunst G., Miller T.E., Morton-Bailey V., Myles P.S., Ostermann M., Raphael J., Saugel B., Sessler D.I., Shaw A.D., Zarbock A. Perioperative Quality Initiative (POQI) International consensus statement on perioperative arterial pressure management. *British Journal of Anaesthesia*. 2024; 133 (2): 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2024.04.046>
24. Maheshwari K., Shimada T., Yang D., Khanna S., Cywinski J.B., Irefin S.A., Ayad S., Turan A., Ruetzler K., Qiu Y., Saha P., Mascha E.J., Sessler D.I. Hypotension Prediction Index for Prevention of Hypotension during Moderate- to High-risk Noncardiac Surgery: A Pilot Randomized Trial. *Anesthesiology*. 2020; 133 (6): 1214–1222. <https://doi.org/10.1097/ALN.00000000000003557>
25. Казаков А. С., Колонтарев К. Б., Горелова Е. С., Гребенчиков О. А. Коррекция гипотензии у пациентов при выполнении робот-ассистированной радикальной простатэктомии. *Общая реаниматология*. 2022; 18 (4): 29–35. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2022-4-39-35>
26. Казаков А. С., Колонтарев К. Б., Горелова Е. С., Гребенчиков О. А. Correction of the Elevated Blood Pressure in Patients Undergoing Robot-Assisted Radical Prostatectomy. *General Reanimatology*. 2022; 18 (4): 29–35. [In Russ.]. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2022-4-39-35>
27. Ауфарахманов И. И., Миронов П. И., Галеев И. Р., Павлов В. Н. Влияние положения Тренделенбурга и пневмоперитонеума на сердечно-сосудистую систему при робот-ассистированной радикальной простатэктомии. *Экспериментальная и клиническая урология*. 2020; (4): 10–17. <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2020-13-4-10-17>
28. Luffarakhmanov I.I., Mironov P.I., Galeev I.R., Pavlov V.N. Influence of Trendelenburg position and pneumoperitoneum on the cardiovascular system during robotic-assisted radical prostatectomy. *Experimental and Clinical Urology*. 2020; (4): 10–17. [In Russ.]. <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2020-13-4-10-17>
29. Kim T.L., Kim N., Shin H.J., Cho M.R., Park H.R., Kim S.Y. Intraoperative mean arterial pressure and acute kidney injury after robot-assisted laparoscopic prostatectomy: a retrospective study. *Scientific Reports*. 2023; 13 (1): 3318. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30506-1>
30. Wang J., Li Y., Su H., Zhao J., Tu F. Carotid artery corrected flow time and respiratory variations of peak blood flow velocity for prediction of hypotension after induction of general anesthesia in elderly patients. *BMC geriatrics*. 2022; 22 (1): 882. <https://doi.org/10.1186/s12877-022-03619-x>
31. Chen Y., Liu Z., Fang J., Xie Y., Zhang M., Yang J. Correlation of carotid corrected flow time and respirophasic variation in blood flow peak velocity with stroke volume variation in elderly patients under general anaesthesia. *BMC anesthesiology*. 2022; 22 (1): 246. <https://doi.org/10.1186/s12871-022-01792-5>
32. Feld S.I., Hippe D.S., Miljacic L., Polissar N.L., Newman S.-F., Nair B.G., Vavilala M.S. A Machine Learning Approach for Predicting Real-time Risk of Intraoperative Hypotension in Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurosurgical Anesthesiology*. 2023; 35 (2): 215–223. <https://doi.org/10.1097/ANA.0000000000000819>
33. Park I., Park J.H., Koo Y.H., Koo C.-H., Koo B.-W., Kim J.-H., Oh A.-Y. Feasibility of a Machine Learning Classifier for Predicting Post-Induction Hypotension in Non-Cardiac Surgery. *Yonsei Medical Journal*. 2025; 66 (3): 160–171. <https://doi.org/10.3349/ymj.2024.0020>
34. Zhang G., Yuan J., Yu M., Wu T., Luo X., Chen F. A machine learning method for acute hypotensive episodes prediction using only non-invasive parameters. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2021; 200: 105845. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105845>
35. Lee J., Woo J., Kang A.R., Jeong Y.-S., Jung W., Lee M., Kim S.H. Comparative Analysis on Machine Learning and Deep Learning to Predict Post-Induction Hypotension. *Sensors*. 2020; 20 (16): 4575. <https://doi.org/10.3390/s20164575>

Статья поступила / Received 05.09.2025

Получена после рецензирования / Revised 10.09.2025

Принята в печать / Accepted 28.10.2025

Сведения об авторах

Андреев Вячеслав Сергеевич, врач анестезиолог-реаниматолог отделения анестезиологии-реанимации № 79¹.

E-mail: reanimatology@outlook.com. ORCID: 0000-0002-4388-6601

Власенко Алексей Викторович, д.м.н., проф., зав. кафедрой анестезиологии, реаниматологии и неотложной медицины², зав. отделением анестезиологии-реанимации № 32¹. E-mail: dr.vlasenko67@mail.ru. ORCID: 0000-0003-4535-2563

Корниенко Андрей Николаевич, д.м.н., зав. отделением анестезиологии-реанимации № 79¹. E-mail: ankornienko@ya.ru. ORCID: 0009-0005-1424-6970

Казаков Андрей Сергеевич, к.м.н., врач анестезиолог-реаниматолог отделения анестезиологии-реанимации № 23¹. E-mail: anesteziolog@icloud.com. ORCID: 0009-0008-2271-1627

Родионов Евгений Петрович, к.м.н., доцент, заместитель главного врача по анестезиологии-реанимации¹, доцент кафедры анестезиологии, реаниматологии и неотложной медицины². E-mail: dr.rodiонов@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3852-8877

Колонтарев Константин Борисович, д.м.н., проф., заместитель руководителя Московского урологического центра¹. E-mail: kb80@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-4511-5998

Евдокимов Евгений Александрович, д.м.н. проф., заслуженный врач РФ, почетный заведующий кафедрой², проф. кафедры². E-mail: ea_evdokimov@mail.ru. ORCID: 0000-0001-8569-8667

¹ Центр анестезиологии и реаниматологии БУЗ города Москвы «Московский многопрофильный научно-клинический центр имени С.П. Боткина Департамента здравоохранения города Москвы», Москва, Россия

² Кафедра анестезиологии, реаниматологии и неотложной медицины ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, Москва, Россия

Автор для переписки: Андреев Вячеслав Сергеевич. E-mail: reanimatology@outlook.com

Для цитирования: Андреев В.С., Власенко А.В., Корниенко А.Н., Казаков А.С., Родионов Е.П., Колонтарев К.Б., Евдокимов Е.А. Машинное обучение с использованием ультразвуковых показателей в прогнозировании интраоперационной гипотензии при робот-ассистированной радикальной простатэктомии. *Медицинский алфавит*. 2025; (27): 30–38. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-27-30-38>

About authors

Andreev Vyacheslav S., anesthesiologist-resuscitator at Anesthesiology-Resuscitation Dept No. 79¹. E-mail: reanimatology@outlook.com. ORCID: 0000-0002-4388-6601

Vlasenko Alexey V., DM Sci (habil.), professor, head of Dept of Anesthesiology, Resuscitation and Emergency Medicine², head of Anesthesiology-Resuscitation Dept No. 32¹. E-mail: dr.vlasenko67@mail.ru. ORCID: 0000-0003-4535-2563

Kornienko Andrey N., DM Sci (habil.), head of Anesthesiology-Resuscitation Dept No. 79¹. E-mail: ankornienko@ya.ru. ORCID: 0009-0005-1424-6970

Kazakov Andrey S., PhD Med, anesthesiologist-resuscitator at Anesthesiology and Resuscitation Dept No. 23¹. E-mail: anesteziolog@icloud.com. ORCID: 0009-0008-2271-1627

Rodionov Evgeny P., PhD Med, Honored Doctor of the Russian Federation, associate professor at Dept of Anesthesiology, Resuscitation and Emergency Medicine², deputy chief physician for Anesthesiology and Resuscitation¹. E-mail: dr.rodiонов@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3852-8877

Kolontarev Konstantin B., DM Sci (habil.), professor, Moscow Urology Center deputy head¹. E-mail: kb80@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-4511-5998

Evdokimov Evgeny A., DM Sci (habil.), professor, Honored Doctor of the Russian Federation, Honorary Head of Dept², professor at Dept². E-mail: ea_evdokimov@mail.ru. ORCID: 0000-0001-8569-8667

¹ Botkin Hospital, Moscow, Russia

² Russian Medical Academy for Continuing Professional Education, Moscow, Russia

Corresponding author: Andreev Vyacheslav S. E-mail: reanimatology@outlook.com

For citation: Andreev V.S., Vlasenko A.V., Kornienko A.N., Kazakov A.S., Rodionov E.P., Kolontarev K.B., Evdokimov E.A. Machine learning with ultrasound examination for prediction of intraoperative hypotension during robot-assisted radical prostatectomy. *Medical alphabet*. 2025; (27): 30–38. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-27-30-38>

