



ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ИСХОДА ПРИ СИНДРОМЕ НАТЯЖЕНИЯ СПИННОГО МОЗГА У ДЕТЕЙ СО СПИНАЛЬНОЙ ДИЗРАФИЕЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.А. Калашиников^{1,2}, С.О. Рябых^{1,3}, В.С. Климов^{1,4,5}, С.А. Горчаков²

¹Научно-исследовательский клинический институт педиатрии и детской хирургии
им. акад. Ю.Е. Вельтищева, Россия, Москва;

²Детская городская клиническая больница св. Владимира, Россия, Москва;

³Клиника высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова Санкт-Петербургского
государственного университета, Россия, Санкт-Петербург;

⁴Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Россия, Москва;

⁵Европейский медицинский центр, Россия, Москва

Цель исследования. Разработать и оценить прогностическую модель неблагоприятного исхода вариантов микрохирургической дефиксации и укорачивающей вертебротомии у детей с синдромом натяжения спинного мозга на фоне спинальной дизрафии.

Материал и методы. Ретроспективная когорта из 120 детей со спинальной дизрафией и синдромом натяжения спинного мозга распределялась случайно в обучающую (группа 1 — оперированные пациенты) и тестовую (группа 0 — неоперированные дети с катамнезом) выборки (70 % : 30 %). Сравнение обучающей и тестовой выборок не выявило статистически значимых различий по основным признакам, что подтверждает сопоставимость групп. Рассматривали демографические, клиничко-неврологические и нейровизуализационные признаки. Оценивали прогностическую эффективность трех моделей: LASSO-регрессии, дерева решений и eXtreme Gradient Boosting (XGB). Балансировка классов выполнена в модели обучения SMOTE. Качество оценивали по ROC-AUC, чувствительности/специфичности, точности и Brier-score с 95% доверительным интервалом, клиническую полезность — по Decision Curve Analysis (DCA), интерпретацию — через важность признаков и SHAP для XGB.

Результаты. LASSO показала ROC-AUC 0,82 и точность 80,6 % на тесте; дерево решений: ROC-AUC — 0,64 и точность — 69,4 %. Наилучшие показатели получены у XGB (ROC-AUC — 0,97; точность — 86,1 %), что соответствует отличному уровню дискриминации. Ведущими предикторами неблагоприятного исхода выступали трофические нарушения, деформация голени, укорачивающая вертебротомия, утолщение терминальной нити ≥ 2 мм, параметры тазовых функций; DCA подтвердил положительную чистую выгоду модели при широком диапазоне пороговых вероятностей.

Заключение. Результаты согласуются с современными представлениями о результатах лечения синдрома натяжения спинного мозга и применимости ML-подходов в нейрохирургии детского возраста. Ансамблевая модель XGB обеспечивает высокую точность и клиническую ценность в прогнозировании неблагоприятных исходов у детей с синдромом натяжения спинного мозга, что делает ее перспективным инструментом стратификации риска, который может быть имплементирован в программы поддержки принятия решений с выбором максимально безопасной и эффективной хирургической тактики при спинальной дизрафии.

Ключевые слова: спинальная дизрафия; синдром натяжения спинного мозга; дети; прогностическая модель; XGBoost; LASSO; ROC-AUC; Decision Curve Analysis.

Для цитирования: Калашиников А.А., Рябых С.О., Климов В.С., Горчаков С.А. Построение прогностических моделей неблагоприятного исхода при синдроме натяжения спинного мозга у детей со спинальной дизрафией и оценка их эффективности // Хирургия позвоночника. 2026. Т. 23, № 3. С. 43–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.3.43-58>

DEVELOPMENT OF PREDICTIVE MODELS FOR ADVERSE OUTCOMES IN CHILDREN WITH TETHERED SPINAL CORD SYNDROME ASSOCIATED WITH SPINAL DYSRAPHISM AND ASSESSMENT OF THEIR EFFECTIVENESS

A.A. Kalashnikov^{1,2}, S.O. Ryabykh^{1,3}, V.S. Klimov^{1,4,5}, S.A. Gorchakov²

¹Research and Clinical Institute for Pediatrics and Pediatric Surgery n.a. Acad. Yu.E. Veltishchev, Moscow, Russia;

²St. Vladimir City Children's Clinical Hospital, Moscow, Russia;

³Pirogov Clinic of High Medical Technologies at St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia;

⁴Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia;

⁵European Medical Center, Moscow, Russia

Objective. To develop and evaluate a model for predicting adverse outcomes of microsurgical untethering and vertebral shortening osteotomy in children with tethered spinal cord syndrome associated with spinal dysraphism.

Material and Methods. A retrospective cohort of 120 children with spinal dysraphism and tethered cord syndrome was randomly divided into a training set (Group 1: operated patients) and a test set (Group 0: non-operated children with follow-up data). A comparison of the training and test sets revealed no statistically significant differences in key characteristics, confirming the comparability of the groups. Demographic, clinical-neurological, and neuroimaging features were analyzed. The predictive performance of three models was evaluated: LASSO regression, decision tree, and eXtreme Gradient Boosting (XGB). Class balancing was performed using the SMOTE technique. Model quality was assessed using ROC-AUC, sensitivity/specificity, accuracy, and Brier score (with 95% confidence intervals); clinical utility was quantified using Decision Curve Analysis (DCA); and interpretation was based on feature importance and SHAP values for the XGB model.

Results. LASSO yielded an ROC-AUC of 0.82 and an accuracy of 80.6 % on the test set, whereas the decision tree showed an ROC-AUC of 0.64 and an accuracy of 69.4 %. The best performance was achieved by XGB (ROC-AUC 0.97; accuracy 86.1 %), indicating an excellent level of discrimination. Key predictors of an adverse outcome included trophic disturbances, lower leg deformity, shortening vertebro-tomy, filum terminale thickening ≥ 2 mm, and pelvic function parameters; DCA confirmed the model's positive net benefit across a wide range of threshold probabilities.

Conclusion. The results align with current understanding regarding treatment outcomes for tethered spinal cord syndrome and the applicability of machine learning approaches in pediatric neurosurgery. The XGB ensemble model demonstrates high accuracy and clinical utility in predicting adverse outcomes in children with tethered spinal cord syndrome, making it a promising tool for risk stratification; it could be integrated into decision-support systems to help select the safest and most effective surgical strategy for spinal dysraphism.

Key Words: spinal dysraphism; tethered cord syndrome; children; predictive model; XGBoost; LASSO; ROC-AUC; Decision Curve Analysis.

Please cite this paper as: Kalashnikov AA, Ryabykh SO, Klimov VS, Gorchakov SA. Development of predictive models for adverse outcomes in children with tethered spinal cord syndrome associated with spinal dysraphism and assessment of their effectiveness. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2026;23(3):43–58. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.3.43-58>

Синдром натяжения спинного мозга (СНСМ) у детей – частое проявление спинальной дизрафии, ассоциированное с неврологическим дефицитом, ортопедическими деформациями и нарушениями функций тазовых органов. После хирургического лечения болевые и моторные симптомы регрессируют значимо чаще, тогда как дисфункция мочевого пузыря сохраняется у существенной доли пациентов, что подчеркивает важность своевременной диагностики и стратификации риска неблагоприятных исходов [1]. Современные клинические рекомендации и обзоры подчеркивают ключевую роль МРТ в диагностике дизрафических состояний (в том числе липомы терминальной нити) и определяют ряд четких диагностических критериев СНСМ [2–4]. Однако они не содержат критерии прогноза исхода устранения СНСМ, что определяет как необходимость их стандартизации у детей [5, 6], так и обоснования на их основе четких моделей систем поддержки принятия врачебных решений. При всей очевид-

ности селекции критериев СНСМ выбор инструментов математического анализа их отбора также остается открытым.

Цель исследования – разработать и оценить прогностическую модель неблагоприятного исхода вариантов микрохирургической дефиксации и укорачивающей вертебротомии у детей с СНСМ на фоне спинальной дизрафии.

Материал и методы

В ретроспективную выборку включены 120 пациентов детского возраста с синдромом фиксации и натяжения спинного мозга при спинальной дизрафии, оперированные тремя бригадами хирургов в трех профильных учреждениях – Научно-исследовательском клиническом институте педиатрии и детской хирургии им. Ю.Е. Вельтищева (Москва), Детской городской клинической больнице св. Владимира (Москва), Клинике высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова (Санкт-Петербург). В качестве контрольной группы собра-

ны пациенты тождественной нозологической группы и возраста, наблюдаемые этими же специалистами, но которым не выполняли операции микрохирургической дефиксации и укорачивающей вертебротомии.

Ретроспективная когорта распределялась случайно в обучающую (группа 1 – оперированные пациенты) и тестовую (группа 0 – неоперированные дети с катамнезом) выборки в соотношении 70 % : 30 %.

При построении модели рассматривали демографические, клинические, уродинамические и ортопедические характеристики, а также МР-признаки (липома/утолщение терминальной нити, сирингомиелия, каудальная регрессия и пр., табл. 1). Обучены три модели: L1-регуляризация (LASSO)-логистическая регрессия, дерево решений и XGB (eXtreme Gradient Boosting); дисбаланс классов в обучении корректировали SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique). Производительность оценивали по ROC-AUC, чувствительности, специфичности, точности и Brier-score, клиниче-

Таблица 1

Параметры исследования и критерии оценки когорты пациентов

Параметры исследования	Критерии оценки
Моторный статус и нарушение чувствительности	Парез/паралич нижних конечностей по шкале Frenkel. Уровень нарушения чувствительности. Оценка уровня спастичности по Ashworth
Уродинамический дефицит	Оценка контроля мочеиспускания (недержание/задержка мочи). Изменение тонуса мочевого пузыря по данным комплексного уродинамического исследования
Деформации опорно-двигательного аппарата	Наличие вывиха бедра/обоих бедер. Величина деформации позвоночника в сагиттальной плоскости. Прогрессирование деформаций стоп (эквино-каво-варусная, плоско-варусная деформация стоп, пяточные деформации и эквино-вальгусные стопы и их варианты). Прогрессирование контрактур крупных суставов нижних конечностей
МРТ головного и спинного мозга	Дистопия конуса спинного мозга. Наличие сирингомиелии. Наличие миелопатии. Липома терминальной нити, утолщение терминальной нити 2 мм и более. Верификация новых липом, дермальных синусов

Таблица 2

Сравнение качественных характеристик обучающей и тестовой выборок

Переменные		Все	Группа 0 (тестовая выборка)	Группа 1 (обучающая выборка)	p-value
Неблагополучный исход	0	92 (76,7 %)	28 (78,0 %)	64 (76,0 %)	1,000
	1	28 (23,3 %)	8 (22,0 %)	20 (24,0 %)	
Операция не проводилась	0	80 (66,7 %)	23 (64,0 %)	57 (68,0 %)	0,673
	1	40 (33,3 %)	13 (36,0 %)	27 (32,0 %)	
Микрохирургический рететеринг	0	67 (55,8 %)	22 (61,0 %)	45 (54,0 %)	0,446
	1	53 (44,2 %)	14 (39,0 %)	39 (46,0 %)	
Укорачивающая вертебротомия	0	93 (77,5 %)	27 (75,0 %)	66 (79,0 %)	0,643
	1	27 (22,5 %)	9 (25,0 %)	18 (21,0 %)	
Пол	0	70 (58,3 %)	17 (47,0 %)	53 (63,0 %)	0,106
	1	50 (41,7 %)	19 (53,0 %)	31 (37,0 %)	
Возраст ≥ 11 лет	0	57 (47,5 %)	20 (56,0 %)	37 (44,0 %)	0,247
	1	63 (52,5 %)	16 (44,0 %)	47 (56,0 %)	
Исходный диагноз: менингоцеле	0	87 (72,5 %)	24 (67,0 %)	63 (75,0 %)	0,377
	1	33 (27,5 %)	12 (33,0 %)	21 (25,0 %)	
Исходный диагноз: менингомиелоцеле	0	96 (80,0 %)	30 (83,0 %)	66 (79,0 %)	0,626
	1	24 (20,0 %)	6 (17,0 %)	18 (21,0 %)	
Исходный диагноз: менингомиелорадикулоцеле	0	78 (65,0 %)	24 (67,0 %)	54 (64,0 %)	0,802
	1	42 (35,0 %)	12 (33,0 %)	30 (36,0 %)	
Исходный диагноз: липоменингоцеле	0	99 (82,5 %)	30 (83,0 %)	69 (82,0 %)	1,000
	1	21 (17,5 %)	6 (17,0 %)	15 (18,0 %)	
Возраст проведения первичной коррекции: до первых трех дней жизни	0	66 (55,0 %)	24 (67,0 %)	42 (50,0 %)	0,093
	1	54 (45,0 %)	12 (33,0 %)	42 (50,0 %)	
Возраст проведения первичной коррекции: от трех дней до месяца	0	78 (65,0 %)	22 (61,0 %)	56 (67,0 %)	0,559
	1	42 (35,0 %)	14 (39,0 %)	28 (33,0 %)	
Возраст проведения первичной коррекции: от месяца до года	0	96 (80,0 %)	26 (72,0 %)	70 (83,0 %)	0,213
	1	24 (20,0 %)	10 (28,0 %)	14 (17,0 %)	
Коррекция фиксации спинного мозга: не проводилась	0	62 (51,7 %)	21 (58,0 %)	41 (49,0 %)	0,339
	1	58 (48,3 %)	15 (42,0 %)	43 (51,0 %)	

Окончание таблицы 2

Сравнение качественных характеристик обучающей и тестовой выборок

Переменные		Все	Группа 0 (тестовая выборка)	Группа 1 (обучающая выборка)	p-value
Коррекция фиксации спинного мозга: однократная	0	68 (56,7 %)	19 (53,0 %)	49 (58,0 %)	0,574
	1	52 (43,3 %)	17 (47,0 %)	35 (42,0 %)	
Коррекция фиксации спинного мозга: двукратная	0	110 (91,7 %)	32 (89,0 %)	78 (93,0 %)	0,485
	1	10 (8,3 %)	4 (11,0 %)	6 (7,0 %)	
Моторный статус: нет	0	93 (77,5 %)	30 (83,0 %)	63 (75,0 %)	0,352
	1	27 (22,5 %)	6 (17,0 %)	21 (25,0 %)	
Моторный статус: парез	0	72 (60,0 %)	19 (53,0 %)	53 (63,0 %)	0,290
	1	48 (40,0 %)	17 (47,0 %)	31 (37,0 %)	
Моторный статус: парез	0	75 (62,5 %)	23 (64,0 %)	52 (62,0 %)	0,837
	1	45 (37,5 %)	13 (36,0 %)	32 (38,0 %)	
Нарушение чувствительности	0	50 (41,7 %)	13 (36,0 %)	37 (44,0 %)	0,419
	1	70 (58,3 %)	23 (64,0 %)	47 (56,0 %)	
Тип нарушения функции тазовых органов: гипертонический	0	67 (55,8 %)	19 (53,0 %)	48 (57,0 %)	0,659
	1	53 (44,2 %)	17 (47,0 %)	36 (43,0 %)	
Тип нарушения функции тазовых органов: гипотонический	0	85 (70,8 %)	26 (72,0 %)	59 (70,0 %)	0,827
	1	35 (29,2 %)	10 (28,0 %)	25 (30,0 %)	
Тип нарушения функции тазовых органов: атонический	0	88 (73,3 %)	27 (75,0 %)	61 (73,0 %)	0,826
	1	32 (26,7 %)	9 (25,0 %)	23 (27,0 %)	
Деформация позвоночника	0	48 (40,0 %)	13 (36,0 %)	35 (42,0 %)	0,569
	1	72 (60,0 %)	23 (64,0 %)	49 (58,0 %)	
Деформации нижних конечностей нет	0	68 (56,7 %)	23 (64,0 %)	45 (54,0 %)	0,296
	1	52 (43,3 %)	13 (36,0 %)	39 (46,0 %)	
Деформация стоп	0	57 (47,5 %)	15 (42,0 %)	42 (50,0 %)	0,402
	1	63 (52,5 %)	21 (58,0 %)	42 (50,0 %)	
Деформация оси нижних конечностей	0	109 (90,8 %)	32 (89,0 %)	77 (92,0 %)	0,732
	1	11 (9,2 %)	4 (11,0 %)	7 (8,0 %)	
Вывих бедра/бедер	0	99 (82,5 %)	28 (78,0 %)	71 (85,0 %)	0,434
	1	21 (17,5 %)	8 (22,0 %)	13 (15,0 %)	
Контрактуры суставов нижних конечностей	0	112 (93,3 %)	32 (89,0 %)	80 (95,0 %)	0,239
	1	8 (6,7 %)	4 (11,0 %)	4 (5,0 %)	
Гидроцефалия	0	83 (69,2 %)	26 (72,0 %)	57 (68,0 %)	0,635
	1	37 (30,8 %)	10 (28,0 %)	27 (32,0 %)	
Дистопия конуса спинного мозга ниже уровня L ₁ —L ₂	0	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	1,000
	1	120 (100,0 %)	36 (100,0 %)	84 (100,0 %)	
Сирингомиелия	0	64 (53,3 %)	19 (53,0 %)	45 (54,0 %)	0,936
	1	56 (46,7 %)	17 (47,0 %)	39 (46,0 %)	
Липома терминальной нити	0	91 (75,8 %)	26 (72,0 %)	65 (77,0 %)	0,642
	1	29 (24,2 %)	10 (28,0 %)	19 (23,0 %)	
Утолщение терминальной нити 2 мм и более	0	79 (65,8 %)	21 (58,0 %)	58 (69,0 %)	0,257
	1	41 (34,2 %)	15 (42,0 %)	26 (31,0 %)	
Синдром каудальной регрессии	0	83 (69,2 %)	28 (78,0 %)	55 (65,0 %)	0,181
	1	37 (30,8 %)	8 (22,0 %)	29 (35,0 %)	
Дистопия миндалин мозжечка	0	64 (53,3 %)	19 (53,0 %)	45 (54,0 %)	0,936
	1	56 (46,7 %)	17 (47,0 %)	39 (46,0 %)	
Трофические нарушения	0	106 (88,3 %)	30 (83,0 %)	76 (90,0 %)	0,352
	1	14 (11,7 %)	6 (17,0 %)	8 (10,0 %)	

скую полезность – по методу DCA (Decision Curve Analysis), который рекомендуется для оценки реальной ценности прогностических моделей [7, 8].

Результаты

Сравнение обучающей и тестовой выборок

В табл. 2 представлены распределения частот по ключевым бинарным признакам, отражающим структуру исследуемой популяции. Частота неблагоприятных исходов составила 23,3 % (28 из 120 наблюдений) и не различалась между обучающей (24,0 %) и тестовой (22,0 %) группами ($p = 1,000$). Аналогично не было выявлено значимых различий по частоте оперативных вмешательств, рецидивов рететеринга, типу первичного диагноза (менингоцеле, менингомиелоцеле и др.), полу и возрасту пациентов, а также по неврологическим, уродинамическим и ортопедическим характеристикам (p во всех случаях $>0,05$). Это указывает на равномерное распределение клинических состояний между группами и отсутствие систематических смещений при рандомизации. Средний возраст пациентов составил 11 [7,5; 14,0] лет, при этом распределение в обучающей и тестовой выборках статистически не различалось ($p = 0,507$). Таким образом, полученные данные подтверждают корректность деления совокупности на обучающую и тестовую выборки и обеспечивают сопоставимость данных для последующего построения прогностических моделей.

Модель LASSO

В ходе построения модели методом LASSO-регрессии проведен автоматический отбор наиболее информативных признаков (табл. 3). К числу значимых предикторов неблагоприятного исхода отнесены наличие контрактур суставов, гипертонический тип нарушения функции тазовых органов, более позднее проведение первичной коррекции (от трех дней до месяца), диагноз «липоменингоцеле», деформации нижних конеч-

Таблица 3

Результаты отбора предикторов методом LASSO-регрессии

Переменные	coef (B)
Контрактуры суставов нижних конечностей	2,318
Тип нарушения функции тазовых органов: гипертонический	1,583
Возраст проведения первичной коррекции: от трех дней до месяца	1,475
Исходный диагноз: липоменингоцеле	1,391
Рететеринг	1,328
Коррекция фиксации спинного мозга: не проводилась	0,999
Деформация оси нижних конечностей	0,936
Вывих бедра/бедер	0,713
Деформация позвоночника	0,482
Исходный диагноз: менингомиелоцеле	0,424
Синдром каудальной регрессии	0,334
Дистопия миндалик мозжечка	0,205
Моторный статус: парез	0,187
Пол женский	0,181
Моторный статус: нет	0,095
Дистопия конуса спинного мозга ниже уровня L ₁ –L ₂	0,054
Коррекция фиксации спинного мозга: однократная	0,025
Нарушение чувствительности	0,012
Исходный диагноз: менингомиелорадикулоцеле	-0,008
Возраст ≥ 11 лет	-0,088
Коррекция фиксации спинного мозга: двукратная	-0,734
Моторный статус: парез	-0,799
Сирингомиелия	-1,399
Утолщение терминальной нити 2 мм и более	-1,977
Трофические нарушения	-2,357
Деформация стоп	-3,900
Деформации нижних конечностей нет	-4,473
Const	0,020

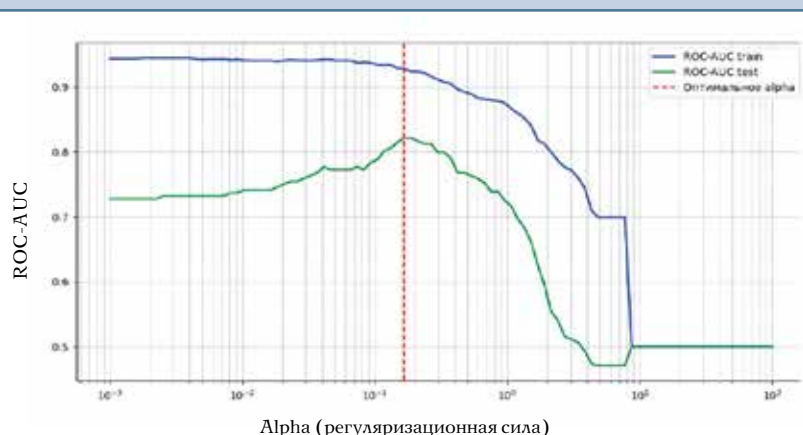


Рис. 1

Оптимизация параметра регуляризации с помощью ROC-AUC



Рис. 2
Сравнение MSE на обучающей и тестовой выборках

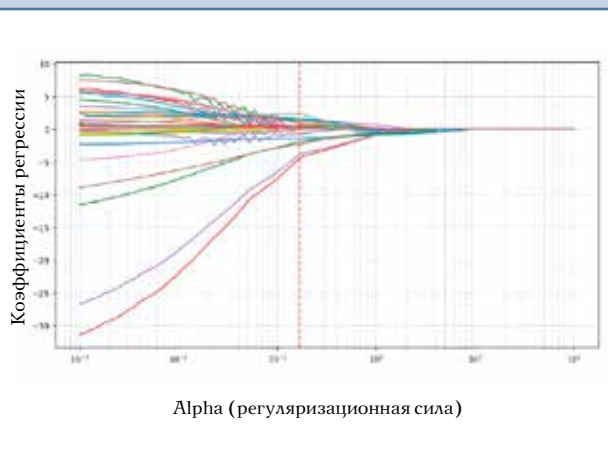


Рис. 3
Коэффициенты LASSO по отношению к Alpha

ностей, а также выполнение дефиксации спинного мозга и отсутствие устранения фиксации спинного мозга. Положительные коэффициенты ($B > 0$) отражают прямую связь с риском неблагоприятного исхода, тогда как отрицательные – защитный эффект (например, наличие синингомиелии, утолщение терминальной нити ≥ 2 мм, трофические нарушения, деформации стоп и т.д.).

На рис. 1–4 представлены ROC-кривая, значения среднеквадратической ошибки (MSE), распределение коэффициентов LASSO и относительная важность признаков. Кривая ROC демонстрирует высокий уровень дискриминационной способности модели; оптимальная точка отсечения составила 0,3, при которой достигается баланс чувствительности и специфичности. Анализ MSE подтвердил

устойчивость модели к переобучению при $\alpha = 0,167$. На диаграмме важности критериев видно доминирование предикторов, связанных с неврологическим и ортопедическим статусом.

Рис. 5 иллюстрирует метрики модели – ROC-AUC, матрицу путаницы и результаты DCA-анализа, который показал, что модель имеет клиническую полезность при порогах вероятности от 0 до 1, превосходя стратегии «лечить всех» и «не лечить никого».

Оценка эффективности модели. Ключевые показатели качества приведены в табл. 4. На обучающей выборке модель достигла ROC-AUC = 9,9 % [88,0; 97,3 %], точности – 83,3 %, чувствительности – 80,0 % и специфичности – 84,4 %. На тестовой выборке показатели составили соответственно ROC-AUC = 82,1 % [65,0; 95,1 %], точность – 80,6 %, чувствительность – 75,0 %, специфичность – 82,1 %. Значения Brier-скора (0,096 и 0,136) свидетельствуют о хорошем калибровочном качестве модели.

На рис. 6 представлено распределение предсказанных вероятностей неблагоприятного исхода в обучающей и тестовой выборках.

Модель «Дерево решений» (Decision Tree)

Метод Decision Tree (DT) применен для построения интерпре-

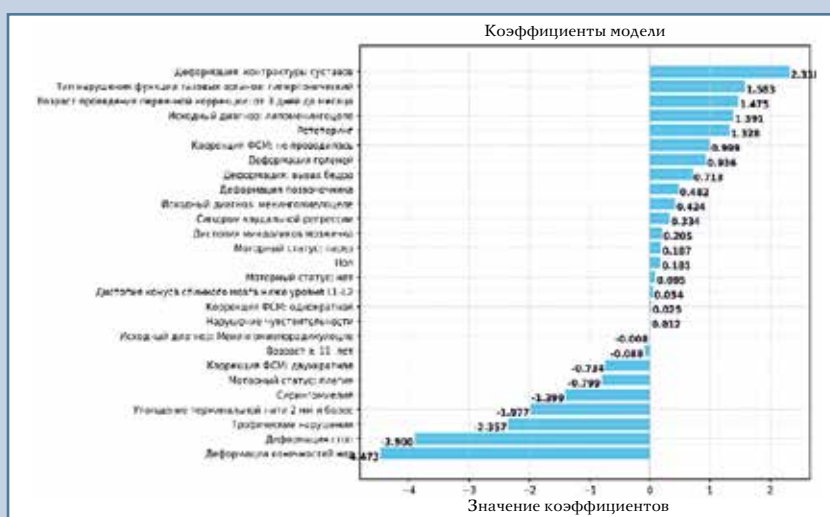
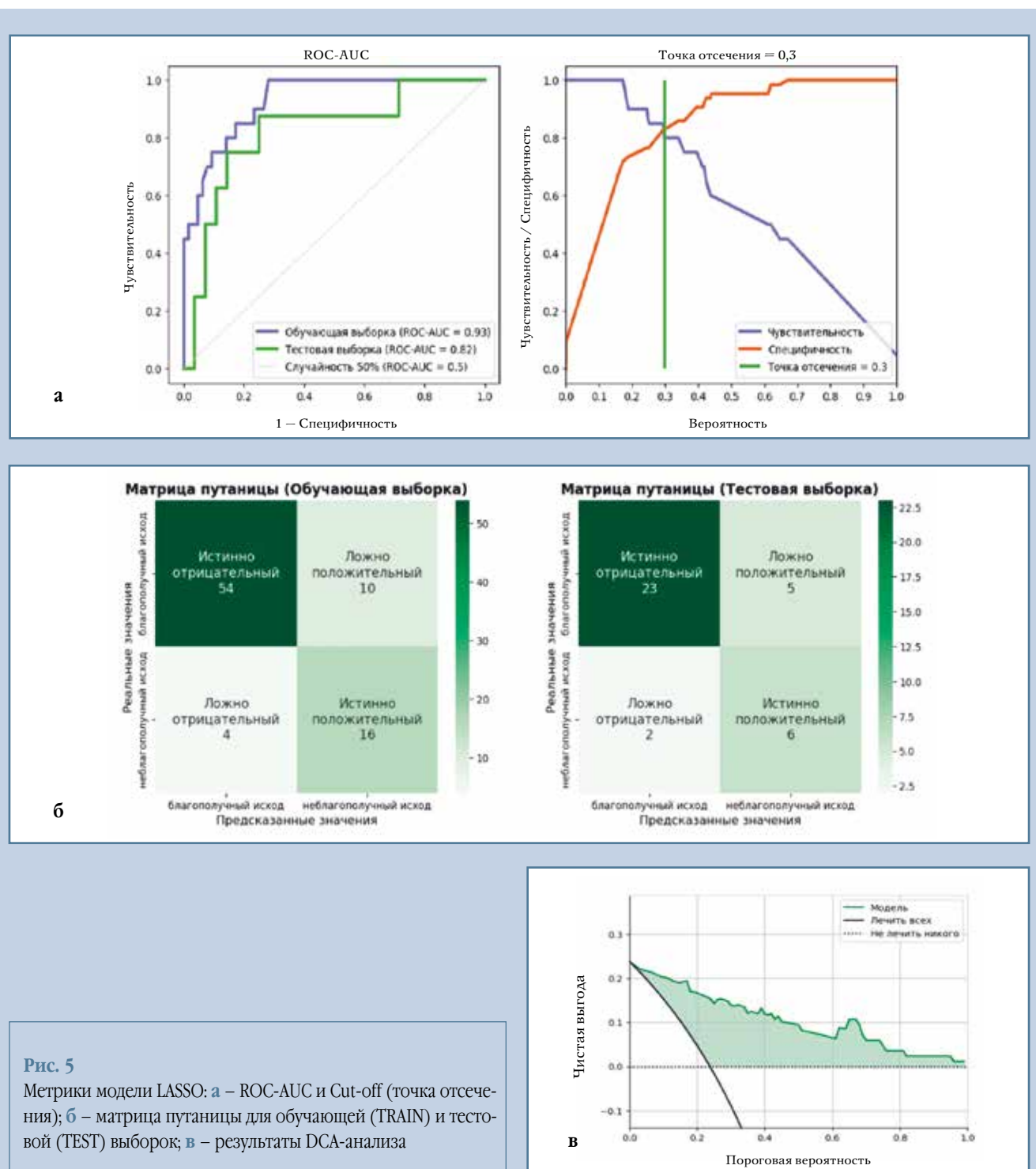


Рис. 4
Важность критериев



тируемой прогностической модели на основе отобранных признаков. На рис. 7 и 8 представлены графические схемы дерева решений для обучающей и тестовой выборок. Корневой узел формируется по признаку «трофические нарушения», а дальней-

шее ветвление определяется «типом нарушения функции тазовых органов» и «возрастом проведения первичной коррекции». Ветви дерева отражают пороговые значения, при которых наиболее точно прогнозируется неблагоприятный исход.

Рис. 9 включает ROC-кривую, матрицу путаницы и DCA-анализ. Кривая ROC демонстрирует высокую чувствительность модели на обучающих данных (ROC-AUC = 0,91) при умеренном снижении результатов на тестовой выборке (ROC-AUC = 0,64). DCA-

Таблица 4

Метрики эффективности модели LASSO

Мера оценки	Обучение	Тестирование
ROC-AUC	92,9 % [88,0 %; 97,3 %]	82,1 % [65,0; 95,1 %]
Точность	83,3 % [76,2 %; 90,5 %]	80,6 % [69,4; 88,9 %]
Чувствительность (1)	80,0 % [64,7 %; 94,7 %]	75,0 % [45,5 %; 100,0 %]
Специфичность (0)	84,4 % [76,7 %; 91,9 %]	82,1 % [69,2 %; 92,9 %]
ROC ± se	92,9 ± 0,0016 %	82,1 ± 0,0027 %
Brier	0,096	0,136

анализ показал, что в диапазоне пороговых вероятностей до 0,8 модель обладает положительной чистой выгодой по сравнению со стратегиями «лечить всех» и «не лечить никого». Ключевые метрики качества приведены в табл. 5.

На обучающей выборке модель продемонстрировала точность 86,9 % [81,0; 92,9 %], чувствительность – 75,0 %, специфичность – 90,6 %. На тестовой выборке показатели составили 69,4 %, 50,0 % и 75,0 % соответственно. ROC-AUC = 63,8 % [44,9; 81,0 %], Brier-скор = 0,222, что свидетельствует о среднем уровне обобщающей способности. Оптимальная точка отсечения составила 0,31 (при значениях 0,31 и больше прогнозировался неблагоприятный исход).

На рис. 10 показано распределение предсказанных вероятностей в обучающей и тестовой выборках. Графики демонстрируют более высокую четкость классификации на обучающем массиве и некоторое размывание границ на тестовой выборке, что характерно для детерминирован-

ных алгоритмов при ограниченном объеме данных.

Модель XGB

(eXtreme Gradient Boosting)

Для построения прогностической модели использован алгоритм XGB ансамблевый метод, основанный на градиентном бустинге решающих деревьев, позволяющий учитывать сложные нелинейные взаимодействия между признаками. Результаты анализа важности признаков представлены в табл. 6.

На рис. 11 визуализированы относительная важность признаков и их вклад в прогноз (SHAP-value анализ).

SHAP-график показывает, что наибольший вклад в увеличение вероятности неблагоприятного исхода вносят трофические нару-

Таблица 5

Метрики оценки качества диагностической/прогностической модели

Мера оценки	Обучение	Тестирование
ROC-AUC	90,6 % [84,6 %; 96,0 %]	63,8 % [44,9 %; 81,0 %]
Точность	86,9 % [81,0 %; 92,9 %]	69,4 % [55,6 %; 80,6 %]
Чувствительность (1)	75,0 % [58,8 %; 89,5 %]	50,0 % [20,0 %; 80,0 %]
Специфичность (0)	90,6 % [84,6 %; 95,7 %]	75,0 % [60,0 %; 87,5 %]
ROC ± se	90,6 ± 0,0016 %	63,8 ± 0,0033 %
Brier	0,093	0,222

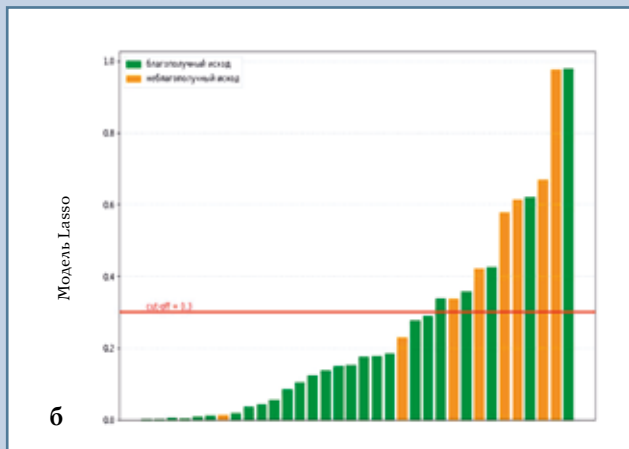
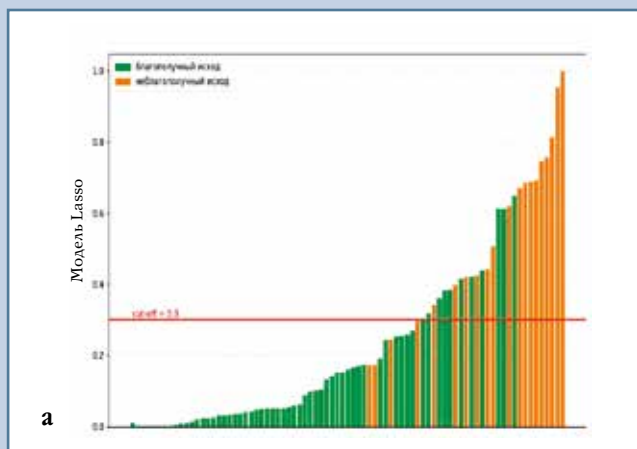


Рис. 6

Модель Lasso: обучающая (а) и тестовая (б) выборки

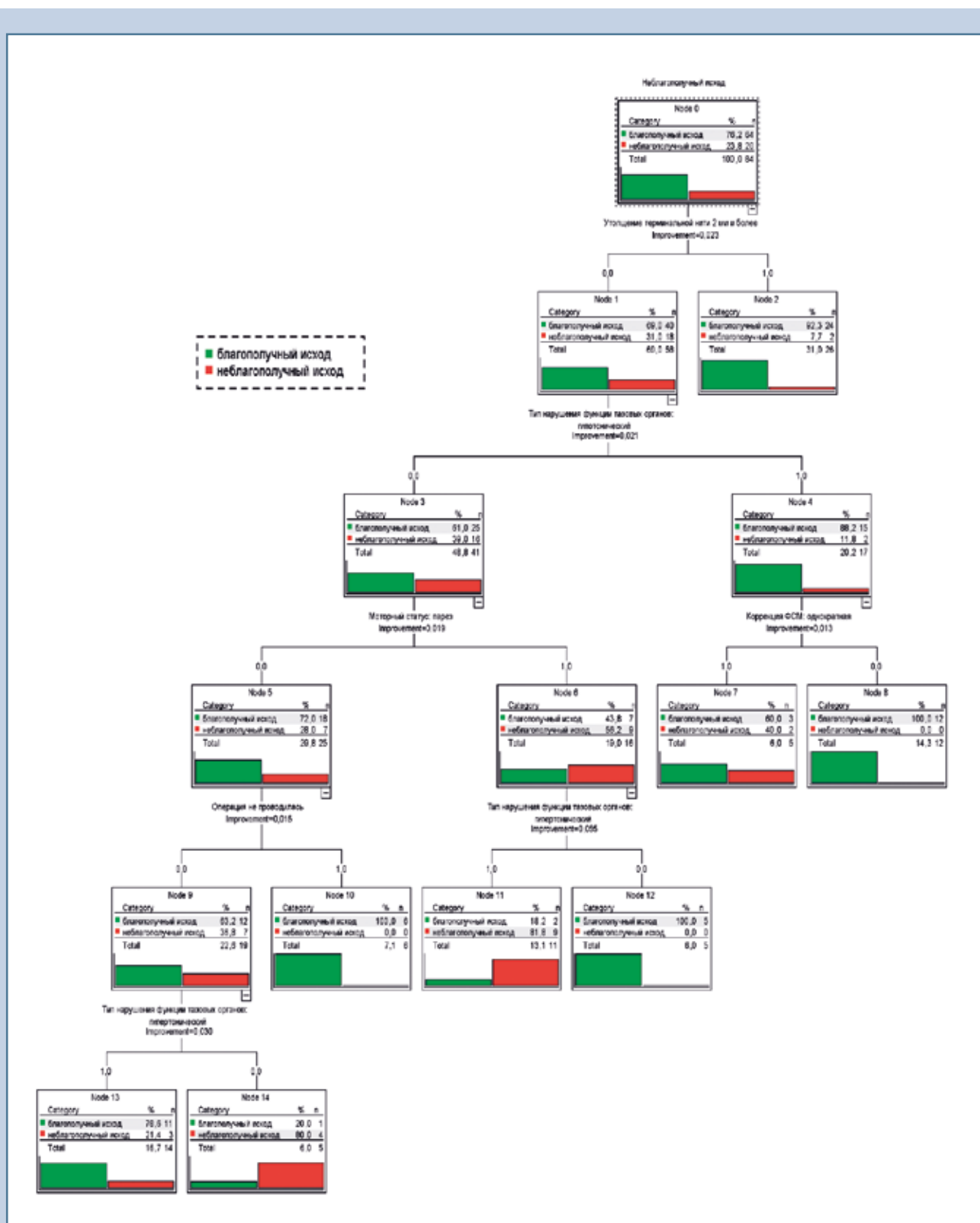


Рис. 7
 Модель «дерево решений» на обучающей выборке

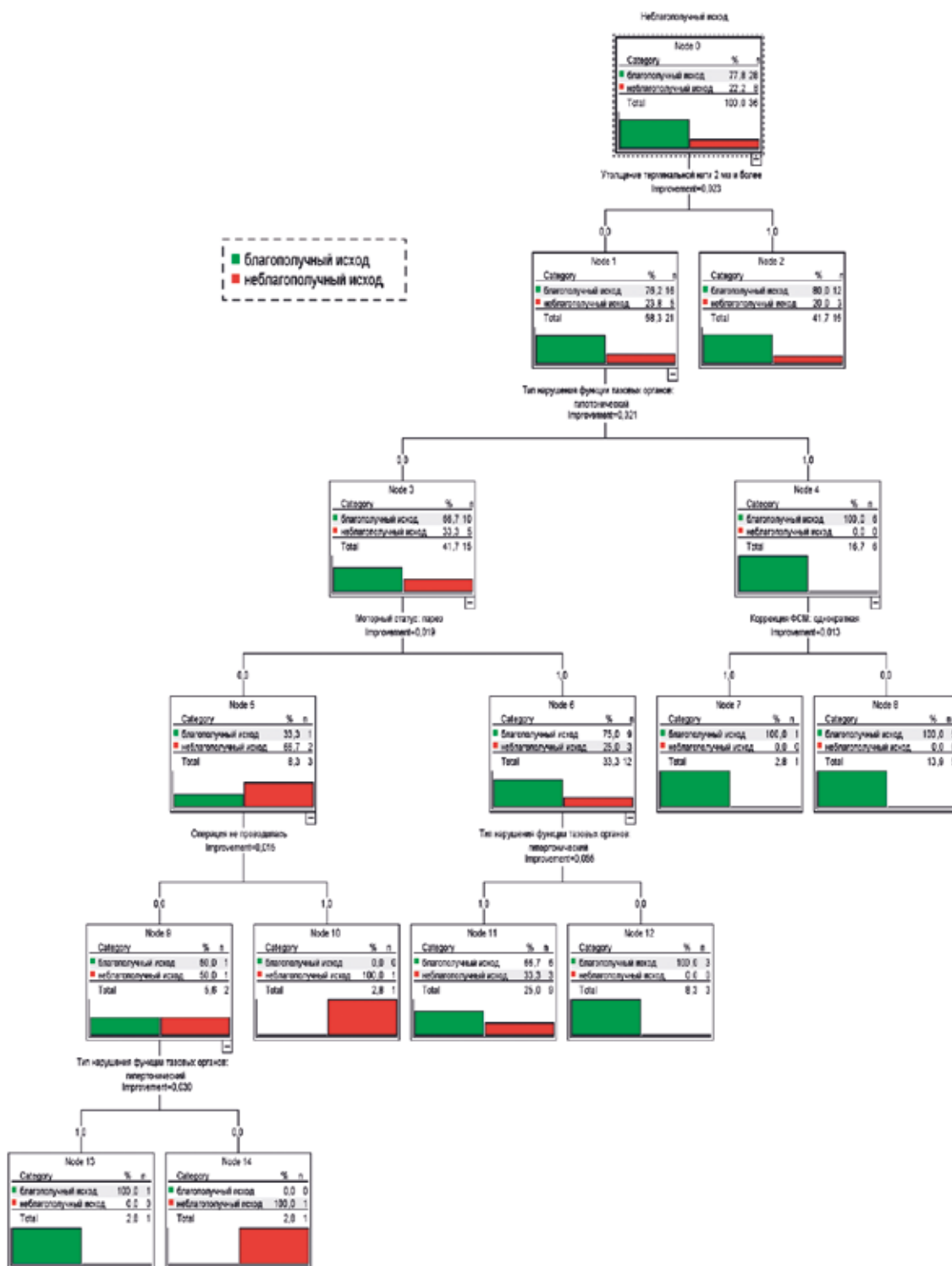
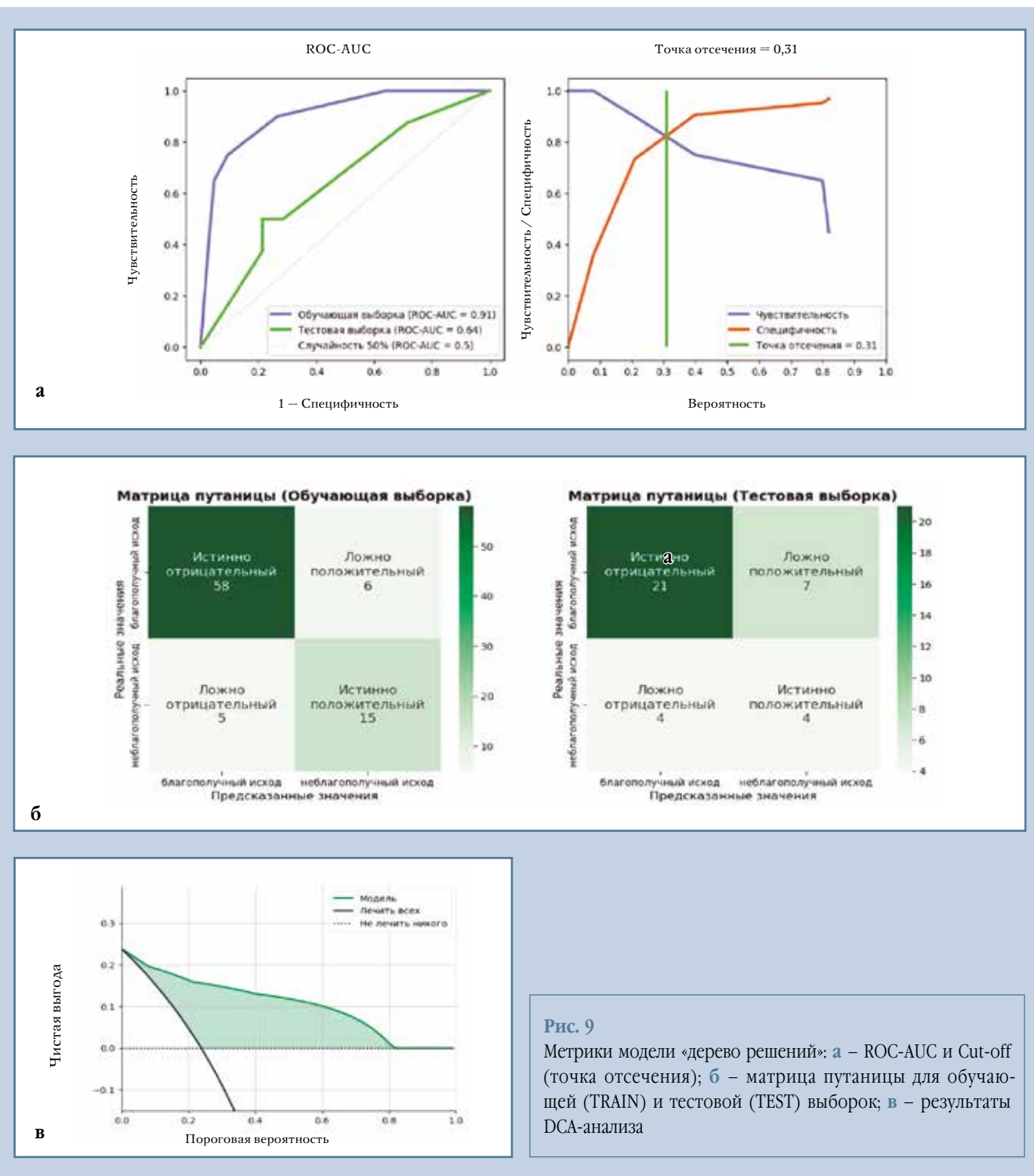


Рис. 8
 Модель «дерево решений» на тестовой выборке



шения, деформация голеней и укорачивающая вертебротомия, тогда как утолщение терминальной нити и коррекция фиксации спинного мозга обладают защитным эффектом. Таким образом, модель XGB успешно выявляет скрытые нелинейные зави-

симости между неврологическими и анатомическими параметрами.

На рис. 12 представлены ROC-кривые, матрицы путаницы и результаты DCA-анализа. Кривая ROC демонстрирует отличную дискриминационную способность модели

как на обучающей, так и на тестовой выборке (ROC-AUC = 0,99 и 0,97 соответственно).

DCA-анализ показал, что модель сохраняет клиническую ценность при порогах вероятности до 0,95, обеспечивая устойчивую чистую выгоду

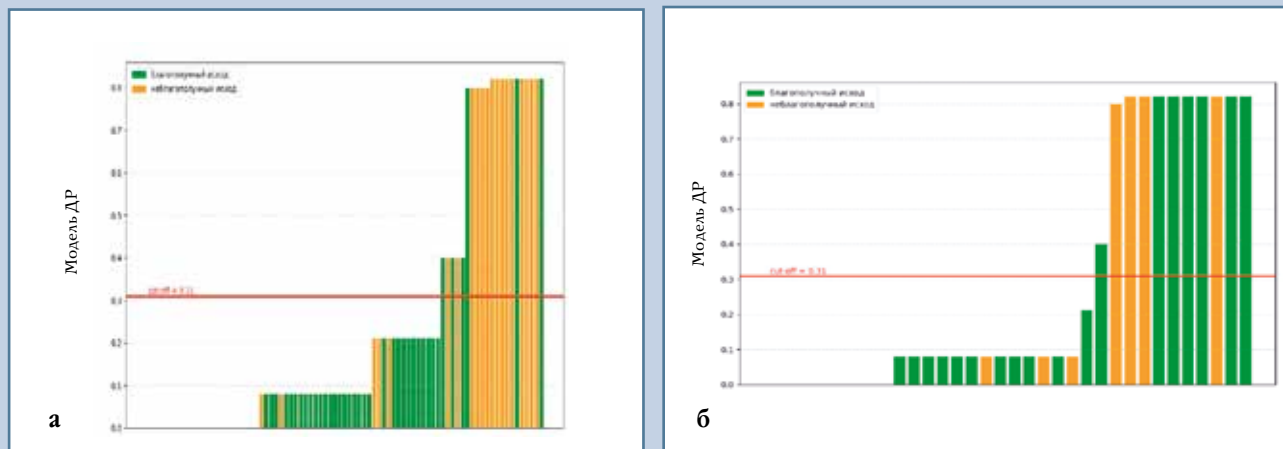


Рис. 10
 Модель «дерево решений» (ДР): обучающая (а) и тестовая (б) выборки

по сравнению с альтернативными стратегиями.

Итоговые метрики качества представлены в табл. 7. На обучающей выборке точность составила 92,9 %, чувствительность – 90,0 %, специфичность 93,8 % и ROC-AUC = 98,6 %. На тестовой выборке – 86,1 %, 62,5 %, 92,9 % и ROC-AUC = 96,7 % соответственно. Значение Бригг-скора 0,085 подтверждает высокую калибровку

и надежность предсказаний. Таким образом, модель XGB продемонстрировала наилучшие показатели среди всех протестированных алгоритмов, что позволяет отнести ее к категории прогностических моделей отличного качества (AUC > 0,9).

На рис. 13 представлено распределение предсказанных вероятностей исходов в обучающей и тестовой выборках. Обе кривые демон-

стрируют отчетливое разделение классов 0 и 1, что отражает высокую стабильность и обобщающую способность модели XGB даже при изменении структуры данных.

Сравнение моделей

Сравнительный анализ продемонстрировал, что наилучшие показатели точности и дискриминационной способности получены при использовании модели XGB, обеспечившей ROC-AUC = 96,7 % и точность – 86,1 % на тестовой выборке, что соответствует уровню отличного качества прогноза. Модель LASSO показала устойчивые, но более умеренные результаты (ROC-AUC = 82,1 %, точность – 80,6 %), что характеризует ее как очень хорошую. В то же время модель DT продемонстрировала наименьшую обобщающую способность (ROC-AUC = 63,8 %), отражая склонность алгоритма к переобучению при небольшом размере выборки. Таким образом, алгоритм XGB признан оптимальным инструментом для прогнозирования неблагоприятного исхода СНСМ у детей со спинальной дизрафией, сочетая высокую точность, устойчивость и клиническую интерпретируемость.

Обсуждение

Данные исследования демонстрируют явное преимущество модели ансамб-

Таблица 6

Значимость предикторов в модели XGB

Переменные	Значимость
Трофические нарушения	0,182
Деформация оси нижних конечностей	0,109
Укорачивающая вертебротомия	0,109
Утолщение терминальной нити 2 мм и более	0,098
Операция не проводилась	0,076
Тип нарушения функции тазовых органов: гипотонический	0,073
Дистопия миндалик мозжечка	0,058
Коррекция фиксации спинного мозга: не проводилась	0,049
Рететеринг	0,048
Исходный диагноз: менингоцеле	0,044
Возраст ≥11 лет	0,041
Тип нарушения функции тазовых органов: гипертонический	0,039
Исходный диагноз: менингомиелоцеле	0,029
Исходный диагноз: липоменингоцеле	0,028
Пол	0,017
Дистопия конуса спинного мозга ниже уровня L ₁ –L ₂	0,000

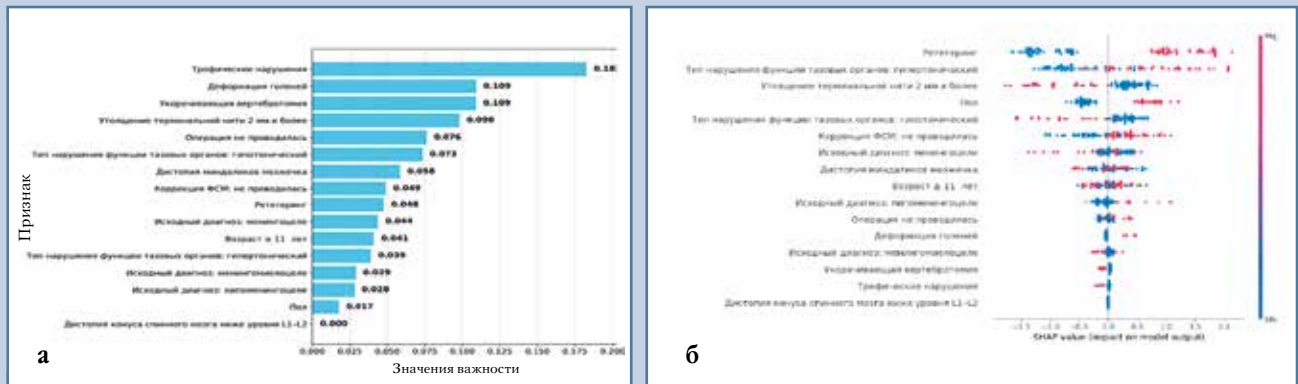


Рис. 11

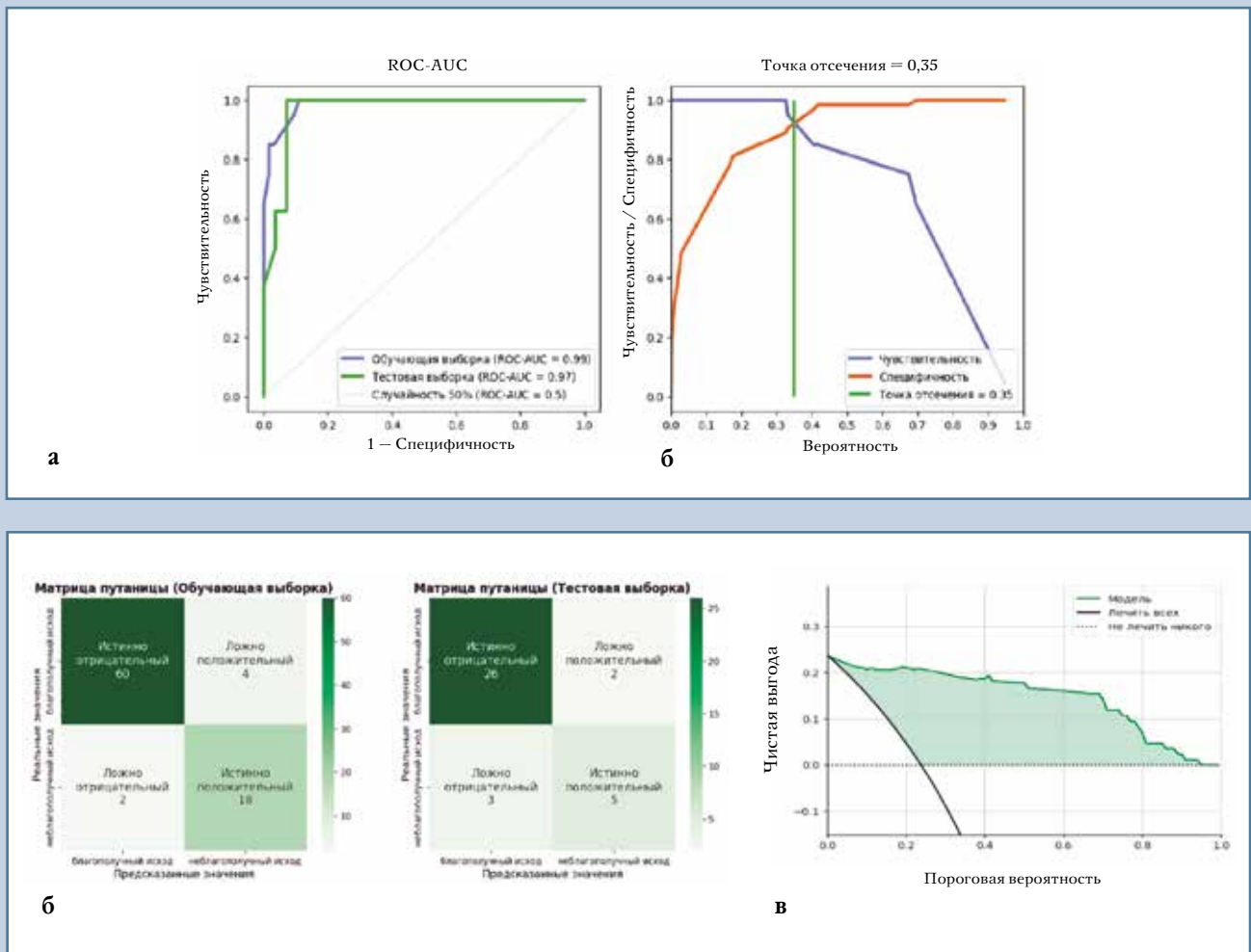
Важность признаков модели XGBoost: **а** – feature importance; **б** – SHAP value

Рис. 12

Метрики модели XGB: **а** – ROC-AUC и Cut-off (точка отсечения); **б** – матрица путаницы для обучающей (TRAIN) и тестовой (TEST) выборки; **в** – результаты DCA-анализа

Таблица 7

Метрики оценки качества диагностической/прогностической модели

Мера оценки	Обучение	Тестирование
ROC-AUC	98,6 % [97,0 %; 99,8 %]	96,7 % [91,1 %; 100,0 %]
Точность	92,9 % [88,1%; 97,6%]	86,1 % [75,0 %; 94,4 %]
Чувствительность (1)	90,0 % [77,8 %; 100,0 %]	62,5 % [30,0 %; 88,9 %]
Специфичность (0)	93,8 % [88,7%; 98,4 %]	92,9 % [84,0 %; 100,0 %]
ROC $\pm$ se	98,6 $\pm$ 0,0012 %	96,7 $\pm$ 0,0029 %
Brier	0,053	0,085

левого подхода XGB над линейной (LASSO) и одно-деревянной (DT) моделями при прогнозировании неблагоприятного исхода у детей со спинальной дизрафией. Эта модель более точно определяет выбор критериев в смежных нейрохирургических сценариях, где XGBoost стабильно превосходит классическую логистическую регрессию по дискриминации, оставаясь при этом интерпретируемой на уровне признаков благодаря SHAP-анализу [9, 10]. В нашей когорте ведущими предикторами выступили трофические нарушения и деформации нижних конечностей, а также МР-морфологические признаки, связанные с СНСМ, а именно утолщение терминальной нити, дистопия конуса и сирингомиелия. Подобные маркеры описываются в клиничко-визуализационных обзорах по дизрафическим

состояниям и спинальным липомам у детей, указывая на их связь с длительным (хроническим) натяжением спинного мозга и его микрохирургической дефиксацией [6, 11].

С практической точки зрения важна не только статистическая точность, но и клиническая выгода модели. Анализ кривых решений (DCA) показал положительную «чистую выгоду» при широком диапазоне порогов вероятности, что означает потенциальную пользу использования модели при выборе тактики ведения (наблюдение, сроки хирургии, интенсивность уродинамического контроля). Методологически это соответствует рекомендациям по отчетности и интерпретации DCA в клинических исследованиях [7, 12].

Наши результаты соотносятся с современными оценками исходов

при СНСМ: хирургическое лечение чаще снижает моторный дефицит, а также нарастание его темпа, уровень болевого синдрома, тогда как течение дисфункции тазовых органов менее предсказуемо с позиции прогноза. Сохранение вероятности выполнения дефиксации спинного мозга (в том числе повторной) в процессе роста ребенка требует, с одной стороны, оценки динамики неврологического, урологического и ортопедического статусов по единым критериям при длительном наблюдении, а с другой – ранней стратификации риска [1, 13]. В отечественной литературе подчеркивается междисциплинарный характер проблемы *spina bifida* и вариабельность ортопедических исходов, что усиливает аргументацию в пользу инструментов персонализированного прогнозирования [14]. В свою очередь, тренд прогрессии литературы по ML-моделям в нейрохирургии поддерживает интеграцию таких алгоритмов с выбором максимально безопасной и эффективной хирургической тактики при спинальной дизрафии в клинические рабочие процессы и системы поддержки принятия врачебных решений при условии соблюдения стандартов разработки и валидации (TRIPOD), а также внешней валидации на независимых выборках [15].

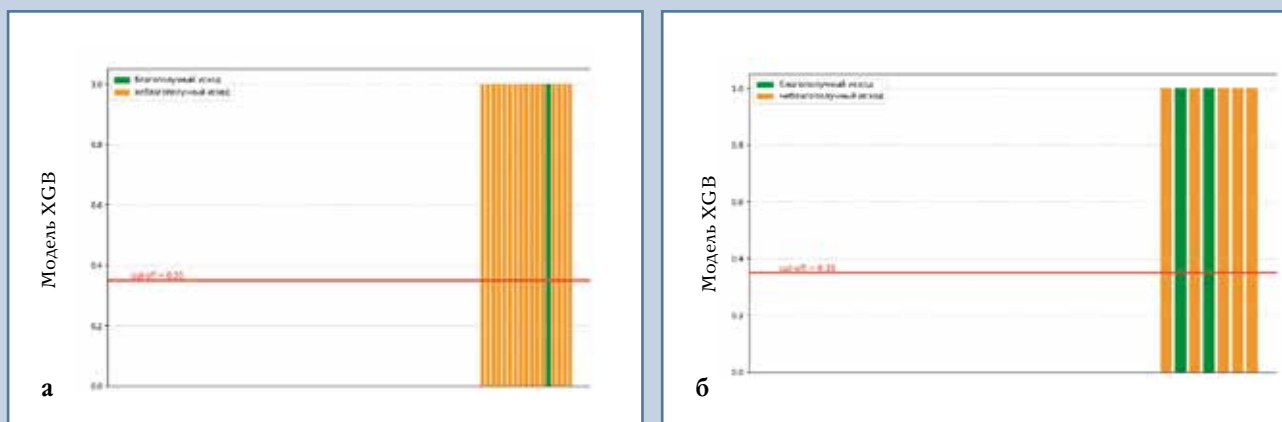


Рис. 13

Модель XGB: обучающая (а) и тестовая (б) выборки

Ограничения исследования. Ограниченная выборка пациентов и отсутствие ее тождественности по нозологическому и нейросегментарному уровням.

Заключение

Ансамблевая модель XGB продемонстрировала отличное качество прог-

ноза и клиническую полезность (по DCA) в задаче предсказания неблагоприятных исходов при СНСМ у детей со спинальной дизрафией. Использование модели может повысить точность стратификации риска, что делает ее перспективным инструментом, который может быть имплементирован в программы поддержки принятия решений с выбором макси-

мально безопасной и эффективной хирургической тактики при спинальной дизрафией. Однако необходима первичная апробация и/или внешняя валидация модели в рамках проспективных мультицентровых исследований для подтверждения ее влияния на клинические решения.

Литература/References

1. Liu M, Deng W, Lu YY, He YZ, Huang LY, Du H. Surgical treatment of tethered cord syndrome showed promising outcome in young children with short duration. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2023;27:1831–1836. DOI: https://doi.org/10.26355/eurrev_202303_31545
2. Хачатрян В.А., Сысоев К.В. Об актуальных проблемах патогенеза, диагностики и лечения синдрома фиксированного спинного мозга (аналитический обзор). *Нейрохирургия и неврология детского возраста*. 2014;3:76–78. [Khachatryan VA, Sysoev KV. Current issues of pathogenesis, diagnostics and treatment of the tethered spinal cord syndrome (analytical review). *Pediatric Neurosurgery and Neurology*. 2014;3:76–78]. EDN: <https://elibrary.ru/SYOZVH>
3. Рябых С.О., Горчаков С.А., Калашников А.А. Синдром фиксированного спинного мозга при *spina bifida*: клинико-лучевая характеристика и показания к оперативному вмешательству (систематический обзор литературы). *Хирургия позвоночника*. 2024;21(1):27–34. [Ryabykh SO, Gorchakov SA, Kalashnikov AA. Tethered spinal cord syndrome associated with *spina bifida*: clinical and radiological characteristics and indications for surgery (systematic review of the literature). *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)*. 2024;21(1):27–34]. DOI: <https://doi.org/10.14531/ss2024.1.27-34> EDN: <https://elibrary.ru/HHGVIT>
4. Сысоев К.В., Тадевосян А.Р., Назинкина Ю.В., Хачатрян В.А. Результаты хирургического лечения детей с синдромом фиксированного спинного мозга. Прогноз на основании данных спинальной 3Тл МРТ-трактографии. *Вопросы нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко*. 2016;80(3):66–73. [Sysoev KV, Tadevosyan AR, Nazinkina YuV, Khachatryan VA. Surgical treatment of outcomes in children with tethered spinal cord syndrome. A prognosis on the basis of spinal 3T MRI tractography. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2016;80(3):66–73]. DOI: <https://doi.org/10.17116/neiro201680366-73> EDN: <https://elibrary.ru/WDOXAH>
5. Hsieh P, Araydin E, Briggs RG, Al-Amodi D, Aleman A, Dubel K, Sardano A, Saint-Val J, Sysawang K, Zhang D, Yagyu S, Motala A, Tolentino D, Hempel S. Diagnosis and treatment of tethered spinal cord: a systematic review. *Pediatrics*. 2024;154:e2024068270. DOI: <https://doi.org/10.1542/peds.2024-068270>
6. Annaperesov NV, Musa G, Lobankin PV, Kuznetsova AA, Livshits M, Nikolaevich UV, Levov AV, Kolcheva MA, Konfetova N, Maier A, Kim AV, Bupe MM, Kislyakov AN, Chmutin GE, Chaurasia B. Pediatric spinal lipomas: insights from a single institution's experience in surgical management of 55 cases. *J Pediatr Neurosci*. 2024;19:97–102. DOI: https://doi.org/10.4103/jpn.jpn_44_24
7. Vickers AJ, van Calster B, Steyerberg EW. A simple, step-by-step guide to interpreting decision curve analysis. *Diagn Progn Res*. 2019;3:18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41512-019-0064-7>
8. Zhang Z, Rousson V, Lee WC, Ferdynus C, Chen M, Qian X, Guo Y. Decision curve analysis: a technical note. *Ann Transl Med*. 2018;6:308. DOI: <https://doi.org/10.21037/atm.2018.07.02>
9. Wang R, Zhang J, Shan B, He M, Xu J. XGBoost machine learning algorithm for prediction of outcome in aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Neuropsychiatr Dis Treat*. 2022;18:659–667. DOI: <https://doi.org/10.2147/NDT.S349956>
10. Yan Z, Wang J, Dong Q, Zhu L, Lin W, Jiang X. XGBoost algorithm and logistic regression to predict the postoperative 5-year outcome in patients with glioma. *Ann Transl Med*. 2022;10:860. DOI: <https://doi.org/10.21037/atm-22-3384>
11. Trapp B, de Andrade Louren o Freddi T, de Oliveira Morais Hans M, Fonseca Teixeira Lemos Calixto I, Fujino E, Alves Rojas LC, Burlin S, Cerqueira Costa DM, Carrete Junior H, Abdala N, Tobaru Tibana LA, Takehara ET, Dalul Gomez G. A practical approach to diagnosis of spinal dysraphism. *Radiographics*. 2021;41:559–575. DOI: <https://doi.org/10.1148/rq.2021200103>
12. Van Calster B, Wynants L, Verbeek JFM, Verbakel JY, Christodoulou E, Vickers AJ, Roobol MJ, Steyerberg EW. Reporting and interpreting decision curve analysis: a guide for investigators. *Eur Urol*. 2018;74:796–804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2018.08.038>
13. Findlay MC, Tenhoeve S, Terry SA, Iyer RR, Brockmeyer DL, Kelly MP, Kestle JRW, Gonda D, Ravindra VM. Disparities in indications and outcomes reporting for pediatric tethered cord surgery: The need for a standardized outcome assessment tool. *Childs Nerv Syst*. 2024;40:1111–1120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00381-023-06246-y>
14. Иванов С.В., Кенис В.М., Щедрина А.Ю., Онуфрийчук О.Н., Ходоровская А.М., Осипов И.Б., Сарычев С.А. *Spina bifida*: мультидисциплинарная проблема (обзор литературы). *Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии*. 2021;11(2):201–213. [Ivanov SV, Kenis VM, Shchedrina AYU, Onufriyчук ON, Khodorovskaya AM, Osipov IB, Sarychev SA. *Spina bifida*: a multidisciplinary problem (a literature review). *Russian Journal of Pediatric Surgery, Anesthesia and Intensive Care*. 2021;11(2):201–213]. DOI: <https://doi.org/10.17816/psaic958> EDN: <https://elibrary.ru/TRMLIX>
15. Warman A, Kalluri AL, Azad TD. Machine learning predictive models in neurosurgery: an appraisal based on the TRIPOD guidelines. Systematic review. *Neurosurg Focus*. 2023;54:E8. DOI: <https://doi.org/10.3171/2023.3.FOCUS2386>

Статья поступила в редакцию 16.12.2025

Рецензирование пройдено 10.09.2026

Подписано в печать 17.09.2026

Received 16.12.2025

Review completed 10.09.2026

Passed for printing 17.09.2026

Дополнительная информация

Вклад авторов. А.А. Калашников – подготовка первоначального варианта рукописи, обзор литературы, систематизация результатов обследований пациентов, участие в анализе данных, оформление итогового текста статьи; С.О. Рябых – осуществление общего научного руководства, проведение критической правки рукописи, уточнение формулировок, касающихся ортопедических вмешательств и диагностических критериев, утверждение финальной версии; В.С. Климов – выполнение научного редактирования разделов, связанных с неврологическими и нейрохирургическими аспектами, предложение правок по интерпретации данных о синдроме фиксации спинного мозга, участие в обсуждении выводов; С.А. Горчаков – редакция клинических разделов, касающихся нейрохирургического лечения, предоставление клинической базы (отделение нейрохирургии ДГКБ св. Владимира), внесение замечаний по методологии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Этическая экспертиза. Ретроспективный дизайн исследования исключал требование об обязательном информированном согласии и проведении этической экспертизы.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

✉ Алексей Андреевич Калашников; Россия, 107014, Москва, ул. Рубцовско-Дворцовая, 1/3, коп. 8; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2987-7950>; glandibula@gmail.com

Сергей Олегович Рябых, д-р мед. наук; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=6382-1107; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8293-0521>; rso_@mail.ru

Владимир Сергеевич Климов, д-р мед. наук; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=1333-2654; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-7594>; vsklimov72@gmail.com

Сергей Александрович Горчаков, канд. мед. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0795-6921>; sagorchakov@mail.ru

Authors' Info

✉ Aleksey Andreevich Kalashnikov; 1/3, bldg. 8 Rubtsovsko-Dvortsovaya str., Moscow, 107014, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2987-7950>; glandibula@gmail.com

Sergey Olegovich Ryabikh, MD, Dr. Sci. (Medicine); eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=6382-1107; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8293-0521>; rso_@mail.ru

Vladimir Sergeevich Klimov, MD, Dr. Sci. (Medicine); eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=1333-2654; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-7594>; vsklimov72@gmail.com

Sergey Alexandrovich Gorchakov, MD, Cand. Sci. (Medicine); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0795-6921>; sagorchakov@mail.ru