

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 519.873

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-149-159

Прогнозирование высоты продольного свода стопы на основе плантографических показателей средствами искусственного интеллекта*

В.А. ХАЗОВ^a, С.О. ЧЕРКАШИН^b, В.В. МИХАЙЛИШИН^c, Е.И. СКИРМОНТ^d,
С.С. ПОЛЕЕВА^f

195067, г. Санкт-Петербург, ул. Бестужевская, 50, Федеральный научно-образова-
тельный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г.А. Альбрехта
Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации

^a xazovv@icloud.com ^b srgchn1@mail.ru ^c mikhailishin_v@mail.ru

^d 812skirmont@mail.ru ^f poleeva01@mail.ru

Настоящая статья посвящена технологии определения высоты продольного свода стопы на основе показателей, рассчитанных при анализе снимков компьютерной плантографии. Высота продольного свода стопы – показатель, отражающий наименьшее расстояние между нижним краем сочленения ладьевидной и медиальной клиновидной костей и опорой и использующийся для выявления опущения продольного свода стопы при заболеваниях стоп ортопедического профиля. Актуальной задачей является прогнозирование высоты продольного свода на основе плантографических и подометрических показателей с помощью технологий искусственного интеллекта (ИИ) для снижения лучевой нагрузки при диагностике и подборе ортопедических изделий. Для прогнозирования высоты продольного свода стопы разработана и оценена модель искусственного интеллекта на основе плантографических показателей. В исследование включены 37 человек, которым была проведена компьютерная плантография и рентгенография стоп под нагрузкой. При отборе значимых признаков применялся корреляционный анализ, а с целью выбора оптимального алгоритма машинного обучения – сравнительный анализ моделей ИИ.

По результатам корреляционного анализа выявлена значимая ($p \leq 0,05$) связь с высотой продольного свода и отобраны следующие показатели для дальнейшего обучения моделей ИИ: длина стопы от наиболее выступающей точки пяточного закругления до центра основания второго пальца, линейный показатель высоты свода, коэффициент распластанности переднего отдела стопы, максимальная ширина стопы в переднем отделе и угол отклонения первого пальца. Наилучшие показатели в задаче прогнозирования высоты продольного свода стопы продемонстрировала модель случайного леса (Random Forest): среднеквадратическая ошибка (MSE) – 6,4359, средняя абсолютная ошибка (MAE) – 2,1674, коэффициент детерминации (R^2) – 0,6932,

* Статья получена 14 апреля 2025 г.

средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) – 7,6152 %, среднеквадратическое отклонение (RMSE) – 2,5369.

Разработанная модель случайного леса обладает высоким качеством работы при прогнозировании высоты продольного свода стопы на основе плантографических и подометрических показателей, что обосновывает целесообразность ее применения для диагностики, подбора и проектирования ортопедических изделий для коррекции и компенсации деформаций стопы.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, случайный лес, компьютерная плантография, рентгенография стоп, плантограмма, высота продольного свода, стопа

ВВЕДЕНИЕ

Рентгенография стоп является наиболее распространенным методом исследования стопы, позволяющим с высокой точностью проводить ее анатомо-функциональную оценку. Неотъемлемой частью этой оценки является измерение высоты продольного свода стопы, которая определяется как наименьшее расстояние между нижним краем сочленения ладьевидной и медиальной клиновидной костей и опорой [1].

Данный рентгенологический показатель используется для выявления опущения продольного свода стопы при заболеваниях ортопедического профиля [2]. Ввиду цифровой трансформации ортезирования этот показатель может быть применен для проектирования ортопедических изделий для стопы и ортопедической обуви [3–5].

Другим инструментальным методом анатомо-функциональной оценки стопы является компьютерная плантография, при проведении которой производится планшетное сканирование подошвенной поверхности стоп. В ходе анализа плантограмм осуществляется расчет показателей, на основе которых проводится анатомо-функциональная оценка стоп [6].

В настоящее время наблюдается активное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ), позволяющих эффективно решать задачи регрессии при анализе медицинских данных [7–9]. Эти технологии могут быть применены для прогнозирования высоты продольного свода стопы на основе плантографических и подометрических показателей с целью снижения лучевой нагрузки на пациентов, если качество работы модели ИИ обеспечивает информативность, достаточную для принятия клинического решения.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработать и оценить модель искусственного интеллекта для прогнозирования высоты продольного свода стопы на основе плантографических показателей.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 37 человек, у десяти из которых было диагностировано плоскостопие (M21.4), а у семи – наружное искривление большого пальца стопы (M20.1). В качестве инструментальных методов обследования использованы плантография стоп под нагрузкой и рентгенография стоп в боковой проекции.

В анализе использованы плантографические показатели: угол Шопарова сустава, угол отклонения первого пальца, коэффициент переднего отдела стопы, коэффициент распластанности переднего отдела стопы, а также рентгенографический показатель – линейный показатель высоты продольного свода [6]. На основе плантограмм определены подометрические показатели, такие как полная длина стопы, длина стопы от наиболее выступающей точки пяточного закругления до центра основания второго пальца, максимальная ширина стопы в переднем и заднем отделах [10].

Отбор признаков для построения моделей выполнялся методом корреляционного анализа с применением коэффициента корреляции Спирмена при уровне значимости $\alpha = 0,05$; сила связи интерпретировалась по шкале Чеддока [11]. Для выбора оптимальной архитектуры и количественной оценки прогностической способности моделей при задаче прогнозирования высоты продольного свода стопы применялись следующие метрики качества [12]:

$$\text{среднеквадратическая ошибка (MSE)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2;$$

$$\text{средняя абсолютная ошибка} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|;$$

$$\text{коэффициент детерминации } R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2};$$

$$\text{средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE)} = \frac{100 \%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|;$$

$$\text{корень из MSE (RMSE)} = \sqrt{\text{MSE}},$$

где n – число наблюдений (объем выборки); y_i – истинное значение i -го объекта; $\hat{y}_i$ – предсказанное моделью значение для i -го объекта; $\bar{y}_i$ – среднее истинных значений целевой переменной.

Во избежание переобучения применялась одноразовая кросс-валидация (Shuffle Split) с разбиением данных в отношении 70 % (обучающая выборка) к 30 % (тестовая выборка). Исходный массив случайным образом перемешивался и делился на две подвыборки: на первой модели обучались, на второй оценивалась их обобщающая способность.

Для количественной оценки вклада отдельных признаков применялся метод перестановочной важности (Permutation Feature Importance), при котором для каждого признака j значения в тестовой выборке случайным образом перемешиваются, после чего рассчитывается базовая метрика M_{orig} и метрика на «разрушенных» данных M_{perm} . Вклад признака определяется как

$$I_j = M_{orig} - M_{perm}.$$

Чем больше величина I_j , тем более значим вклад признака в качество прогнозов [13].

Для проведения корреляционного анализа использовался язык программирования Python с применением библиотеки SciPy для расчета коэффициента корреляции Спирмена. Подготовка данных для обучения моделей машинного обучения выполнялась с использованием библиотеки pandas, а их тренировка и последующая оценка – с помощью библиотеки scikit-learn [14].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Всем пациентам в исследуемой группе проведены компьютерная плантография и рентгенография стоп под нагрузкой. Далее выполнена обработка снимков компьютерной плантографии согласно ранее разработанному алгоритму, по результатам которой получено 74 унифицированных снимка стоп на однородном черном фоне [15]. Затем были рассчитаны плантографические, подометрические и рентгенографические показатели.

Проведен корреляционный анализ между клиническими показателями и высотой продольного свода стопы, результаты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Результаты оценки корреляционной связи между клиническими показателями и высотой продольного свода стопы

The results of the evaluation of the correlation between clinical parameters and the height of the longitudinal arch of the foot

Наименование показателя	Значение коэффициента Спирмена	Сила связи по шкале Чеддока	Значимость связи (p)
Длина стопы от наиболее выступающей точки пяточного закругления до центра основания второго пальца	0,6495	Средняя	Менее 0,001
Полная длина стопы	0,6285		Менее 0,001
Линейный показатель высоты свода	0,4595	Умеренная	Менее 0,001
Коэффициент распластанности переднего отдела стопы	0,3668	Слабая	0,0013
Максимальная ширина стопы в переднем отделе	0,3564		0,0018
Угол отклонения первого пальца	0,2875	Слабая	0,0130
Коэффициент переднего отдела стопы	0,2078		0,0757
Максимальная ширина стопы в заднем отделе	0,1345	Очень слабая	0,2531
Угол Шопарова сустава	0,0563		0,6338

По результатам корреляционного анализа выявлена значимая ($p \leq 0,05$) связь высоты продольного свода стопы со следующими показателями: средняя по силе связь с длиной стопы и длиной стопы от пятки до основания

второго пальца, умеренная связь с линейным показателем высоты свода, слабая связь с коэффициентом распластанности переднего отдела стопы, шириной стопы в переднем отделе и углом отклонения первого пальца стопы.

Выявлена очень сильная значимая корреляционная связь (коэффициент Спирмена 0,99; $p < 0,001$) между длиной стопы и длиной стопы от пятки до основания второго пальца, поэтому показатель, у которого корреляция с целевым признаком наименьшая, был исключен из исследования. Таким образом, для обучения моделей машинного обучения по результатам корреляционного анализа отобраны следующие показатели: длина стопы от пятки до основания второго пальца, линейный показатель высоты свода, коэффициент распластанности переднего отдела стопы, ширина стопы в переднем отделе и угол отклонения первого пальца.

Для выбора оптимальной архитектуры модели искусственного интеллекта для решения задачи определения высоты продольного свода проведен сравнительный анализ следующих моделей машинного обучения: линейная регрессия, метод опорных векторов, случайный лес, градиентный спуск, k -ближайших соседей, AdaBoost, результаты которого приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

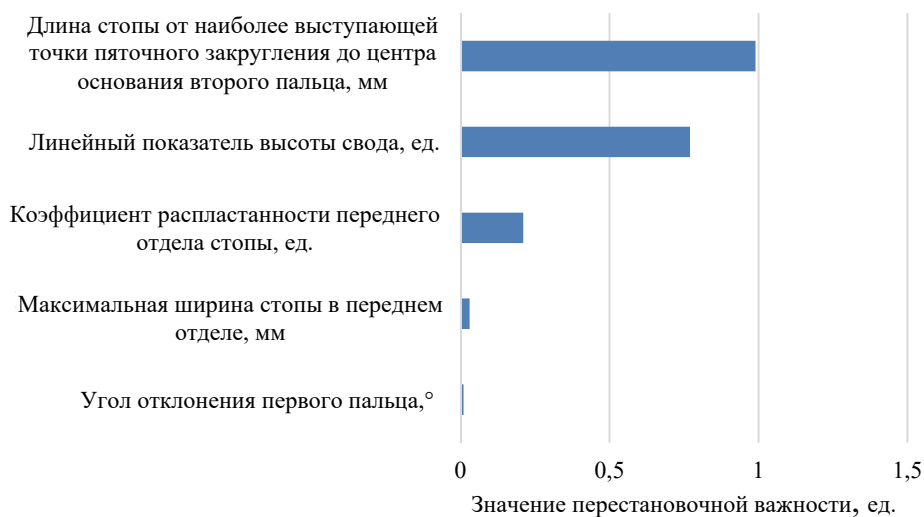
Результаты сравнительного анализа моделей искусственного интеллекта

Results of a comparative analysis of artificial intelligence models

Архитектура модели	Обучающая выборка ($n = 52$)					Валидационная выборка ($n = 22$)				
	Среднеквадратическая ошибка, мм ²	Средняя абсолютная ошибка, мм	Коэффициент детерминации	Средняя абсолютная процентная ошибка, %	Корень средней квадратической ошибки, мм	Среднеквадратическая ошибка, мм ²	Средняя абсолютная ошибка, мм	Коэффициент детерминации	Средняя абсолютная процентная ошибка, %	Корень средней квадратической ошибки, мм
Линейная регрессия	20,86	3,57	0,3856	0,1356	4,57	8,21	2,154	0,6083	0,0778	2,87
Метод опорных векторов	23,57	3,69	0,3058	0,1443	4,85	11,49	2,79	0,4519	0,1000	3,4
AdaBoost	6,12	2,15	0,8197	0,0786	2,47	8,50	2,37	0,5945	0,0836	2,92
Случайный лес	4,14	1,61	0,8781	0,0606	2,03	6,44	2,17	0,6931	0,0761	2,54
Градиентный спуск	0,29	0,43	0,9916	0,0165	0,54	7,81	2,21	0,6275	0,0775	2,8
Метод k -ближайших соседей	18,26	3,52	0,4622	0,1298	4,27	10,05	2,76	0,5208	0,0982	3,17

Алгоритм случайного леса продемонстрировал наилучшие метрики качества работы при решении задачи определения высоты продольного свода стопы: среднеквадратическая ошибка 6,44; средняя абсолютная ошибка 2,17; коэффициент детерминации 0,6931; средняя абсолютная процентная ошибка 0,0761; корень средней квадратической ошибки 2,54.

Далее была рассчитана важность признаков при прогнозировании моделью случайного леса высоты продольного свода стопы, которая представлена на рисунке. По результатам анализа перестановочной важности выявлено, что наибольшей важностью при прогнозировании высоты продольного свода обладают следующие показатели по убыванию: длина стопы от наиболее выступающей точки пяточного закругления до центра основания второго пальца 0,99 и линейный показатель высоты свода 0,77. Значительно меньшей важностью обладает коэффициент распластанности переднего отдела стопы – 0,21, а максимальная ширина стопы в переднем отделе и угол отклонения первого пальца обладают низкой значимостью – 0,03 и 0,01 соответственно. Полученный результат соотносится с данными проведенного корреляционного анализа.



Важность признаков при прогнозировании высоты продольного свода стопы моделью случайного леса

The importance of features in predicting the height of the longitudinal arch of the foot with a random forest model

Таким образом, в модель передаются плантографические показатели: длина стопы от пяточного закругления до основания второго пальца, линейный показатель высоты свода, коэффициент распластанности переднего отдела стопы, максимальная ширина переднего отдела и угол отклонения первого пальца. Корреляционный анализ подтвердил значимые связи этих показателей с высотой продольного свода, а сравнительный анализ моделей машинного обучения выявил случайный лес как наиболее точный, что позволяет применять разработанную модель для диагностики заболеваний и проектирования ортопедических изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель искусственного интеллекта на основе алгоритма случайного леса, способная прогнозировать высоту продольного свода стопы по результатам компьютерной плантографии. Высокими метриками качества работы научно обоснована возможность практического применения этой модели. Уровень средней абсолютной ошибки 2,17 мм при определении высоты продольного свода позволяет использовать прогнозы модели ИИ для диагностики, в том числе скрининговой, и ортопедических заболеваний стоп. Разработанная модель расширяет возможности метода компьютерной плантографии в области разработки и проектирования ортопедических изделий для стопы благодаря возможности прогнозирования высоты продольного свода стопы без необходимости проведения рентгенографического исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современная рентгенологическая диагностика приобретенного плоскостопия взрослых / Н.С. Серова, А.С. Беляев, Д.С. Бобров, К.С. Терновой // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2017. – Т. 98, № 5. – С. 275–280. – DOI: 10.20862/0042-4676-2017-98-5-275-280. – EDN ZUVRAB.
2. Современные методы и средства диагностики статических деформаций стопы человека / Ю.Н. Задерей, В.С. Качер, А.В. Гадацкий, Н.Т. Ковалько, Л.К. Роман, И.Н. Василенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Т. 4, № 2 (40). – С. 23–27. – EDN TMCTKH.
3. Ponomarenko G.N., Smirnova L.M., Yuldashev Z.M. Digital transformation of prosthetics and orthotics // Biomedical Engineering. – 2024. – Vol. 57 (5). – P. 305–310. – DOI: 10.1007/s10527-023-10321-8. – EDN CPCEVQ.
4. Смирнова Л.М. Технология и системы для комплексной оценки состояния опорно-двигательного аппарата и контроля эффективности коррекции его нарушений // Биотехносфера. – 2015. – № 5 (41). – С. 46–54. – EDN VLFNIV.
5. Пономаренко Г.Н. Восстановительная медицина: фундаментальные основы и перспективы развития // Физическая и реабилитационная медицина. – 2022. – Т. 4, № 1. – С. 8–20. – DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-1-8-20. – EDN IUWDXK.
6. Методика использования комплексов серии «Скан» при диагностике состояния стопы и назначении ортопедических стелек: методическое пособие / Л.М. Смирнова, Е.Е. Аржанникова, С.В. Карапетян, О.Э. Гаевская. – СПб.: ЦИАЦАН, 2015. – 64 с. – ISBN 978-5-9905705-6-6. – EDN VYLPZN.
7. Vach W. Regression models as a tool in medical research. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.
8. Predicting fracture outcomes from clinical registry data using artificial intelligence supplemented models for evidence-informed treatment (PRAISE) study protocol / J.F. Dipnall, R. Page, L. Du, et al. // PLoS ONE. – 2021. – Vol. 16 (9). – P. e0257361.
9. Approaching artificial intelligence in orthopaedics: predictive analytics and machine learning to prognosticate arthroscopic rotator cuff surgical outcomes / A.G. Potty, A.S.R. Potty, N. Maffulli, et al. // Journal of Clinical Medicine. – 2023. – Vol. 12 (6). – P. 2369.
10. ГОСТ Р 52623.1–2008. Технологии выполнения простых медицинских услуг функционального обследования: дата введения 2009–09–01. – М.: Стандартинформ, 2009. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200068115> (дата обращения: 10.09.2025).
11. Mukaka M.M. Statistics corner: A guide to appropriate use of the correlation coefficient in medical research // Malawi Medical Journal. – 2012. – Vol. 24 (3). – P. 69–71.
12. Hastie T, Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. – New York: Springer, 2009. – 745 p.

13. Permutation importance: a corrected feature importance measure / A. Altmann, L. Toloşi, O. Sander, T. Lengauer // *Bioinformatics*. – 2010. – Vol. 26 (10). – P. 1340–1347.
14. Scikit-learn: Machine learning in Python / F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, et al. // *Journal of Machine Learning Research*. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825.
15. Михайлишин В.В., Смирнова Л.М., Черкашин С.О. Цифровая обработка электронных планограмм с применением технологий искусственного интеллекта как этап автоматизации плантографических исследований // *Цифровая обработка сигналов*. – 2024. – № 3. – С. 19–24. – EDN IDROCH.

Хазов Валентин Александрович, студент направления «Биотехнические системы и технологии» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). E-mail: hazovv@icloud.com

Черкашин Сергей Олегович, лаборант-исследователь лаборатории инновационных реабилитационно-экспертных технологий Института протезирования и ортезирования Федерального научно-образовательного центра медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г.А. Альбрехта; студент направления «Биотехнические системы и технологии» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). E-mail: srgchn1@mail.ru

Михайлишин Виктор Валерьевич, младший научный сотрудник лаборатории инновационных и экспертно-реабилитационных технологий Федерального научно-образовательного центра медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г.А. Альбрехта. E-mail: mikhailishin_v@mail.ru

Скирмонт Елена Ивановна, старший научный сотрудник отдела ортопедической обуви и специальной одежды для инвалидов Федерального научно-образовательного центра медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г.А. Альбрехта. E-mail: 812skirmont@mail.ru

Полеева Светлана Сергеевна, студент педиатрического факультета Ростовского государственного медицинского университета. E-mail: polceeva01@mail.ru

Khazov Valentin A., student in the field of biotechnical systems and technologies at the St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin). E-mail: hazovv@icloud.com

Cherkashin Sergey O., Laboratory assistant researcher at the laboratories of innovative rehabilitation-expert technologies in the Institute of Prosthetics and Orthotics, Federal Scientific and Educational Centre of Medical and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht; student of Biotechnical Systems and Technologies, St. Petersburg State Electrotechnical University. E-mail: srgchn1@mail.ru

Mikhailishin Viktor V., junior researcher at the Laboratory of Innovative and Expert Rehabilitation Technologies Federal Scientific and Educational Centre of Medical and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht. E-mail: mikhailishin_v@mail.ru

Skirmont Elena I., senior researcher at the Department of Orthopedic Footwear and Special Clothing for the Disabled of the Federal Scientific and Educational Centre of Medical and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht. E-mail: 812skirmont@mail.ru

Poleeva Svetlana S., student of the Pediatric Faculty of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State Medical University" of the Ministry of Healthcare of Russian Federation. E-mail: polceeva01@mail.ru

Prediction of the height of the longitudinal arch of the foot based on plantographic indicators by means of artificial intelligence*

V.A. KHAZOV^a, S.O. CHERKASHIN^b, V.V. MIKHAILISHIN^c, E.I. SKIRMONT^d,
S.S. POLEEVA^f

Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht, 50 Bestuzhevskaya Street, St. Petersburg, 195067, Russian Federation

^a xazovv@icloud.com ^b srgchn1@mail.ru ^c mikhailishin_v@mail.ru

^d 812skirmont@mail.ru ^f poleeva01@mail.ru

Abstract

The height of the longitudinal arch of the foot is an indicator reflecting the smallest distance between the lower edge of the articulation of the navicular and medial cuneiform bones and the support. It is used to detect the lowering of the longitudinal arch of the foot in orthopedic foot diseases. An urgent task is to predict the height of the longitudinal arch based on plantographic and podometric indicators using artificial intelligence (AI) technologies to reduce radiation exposure during diagnosis and the selection of orthopedic products.

To predict the height of the longitudinal arch of the foot, an artificial intelligence model based on plantographic indicators was developed and evaluated. The study included 37 people who underwent computer plantography and radiography of their feet under load. Correlation analysis was used to select significant features, and a comparative analysis of AI models was conducted to determine the optimal machine learning algorithm.

According to the results of the correlation analysis, a significant ($p \leq 0.05$) relationship with the height of the longitudinal arch was identified, and the following indicators were selected for further AI model training: the length of the foot from the most prominent point of the heel rounding to the center of the base of the second toe, the linear index of arch height, the coefficient of spreading of the forefoot, the maximum width of the forefoot, and the angle of deviation of the first toe. The best performance in predicting the height of the longitudinal arch of the foot was demonstrated by the Random Forest model with a mean square error (MSE) of 6.4359, a mean absolute error (MAE) of 2.1674, a coefficient of determination (R^2) of 0.6932, a mean absolute percentage error (MAPE) of 7.6152 %, and a root mean square error (RMSE) of 2.5369.

The developed Random Forest model demonstrates a high predictive accuracy for the height of the longitudinal arch of the foot based on plantographic and podometric indicators, justifying its use for diagnosis, selection, and design of orthopedic products for the correction and compensation of foot deformities.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, random forest, computer plantography, foot radiography, plantogram, height of the longitudinal arch, foot

* Received 14 April 2025.

REFERENCES

1. Serova N.S., Belyaev A.S., Bobrov D.S., Ternovoy K.S. Sovremennaya rentgenologicheskaya diagnostika priobretnennogo ploskostopiya vzroslykh [Modern X-ray diagnosis of adult acquired flatfoot deformity]. *Vestnik rentgenologii i radiologii = Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 2017, vol. 98 (5), pp. 275–280. DOI: 10.20862/0042-4676-2017-98-5-275-280.
2. Zaderei Yu.N., Kacher V.S., Gadyatskii A.V., Koval'ko N.T., Roman L.K., Vasilenko I.N. Sovremennyye metody i sredstva diagnostiki staticheskikh deformatsii stopy cheloveka [Modern methods and means of diagnostics of static deformities of the human foot]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2009, vol. 4, no. 2 (40), pp. 23–27.
3. Ponomarenko G.N., Smirnova L.M., Yuldashev Z.M. Digital transformation of prosthetics and orthotics. *Biomedical Engineering*, 2024, vol. 57 (5), pp. 305–310. DOI: 10.1007/s10527-023-10321-8.
4. Smirnova L.M. Tekhnologiya i sistemy dlya kompleksnoi otsenki sostoyaniya oporno-dvigatel'nogo apparata i kontrolya effektivnosti korrektsii ego narushenii [Technology and systems for a comprehensive assessment of the musculoskeletal system and monitoring the effectiveness of its correction]. *Biotekhnosfera*, 2015, no. 5 (41), pp. 46–54. (In Russian).
5. Ponomarenko G.N. Vosstanovitel'naya meditsina: fundamental'nye osnovy i perspektivy razvitiya [Restorative medicine: fundamental foundations and development prospects]. *Fizicheskaya i reabilitatsionnaya meditsina = Physical and Rehabilitation Medicine*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. 8–20. DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-1-8-20.
6. Smirnova L.M., Arzhannikova E.E., Karapetyan S.V., Gaevskaya O.E. Metodika ispol'zovaniya kompleksov serii «Skan» pri diagnostike sostoyaniya stopy i naznachenii ortopedicheskikh stelek [Methodology of using "Scan" series complexes for foot condition diagnostics and prescription of orthopedic insoles]. St. Petersburg, 2015. 64 p. ISBN 978-5-9905705-6-6.
7. Vach W. *Regression models as a tool in medical research*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2012.
8. Dipnall J.F., Page R., Du L., Costa M., Lyons R.A., Cameron P., de Steiger R., Hau R., Bucknill A., Oppy A., Edwards E., Varma D., Jung M.C., Gabbe B.J. Predicting fracture outcomes from clinical registry data using artificial intelligence supplemented models for evidence-informed treatment (PRAISE) study protocol. *PLoS ONE*, 2021, vol. 16 (9), p. e0257361.
9. Potty A.G., Potty A.S.R., Maffulli N., Blumenschein L.A., Ganta D., Mistovich R.J., Fuentes M., Denard P.J., Sethi P.M., Shah A.A., Gupta A. Approaching artificial intelligence in orthopaedics: predictive analytics and machine learning to prognosticate arthroscopic rotator cuff surgical outcomes. *Journal of Clinical Medicine*, 2023, vol. 12 (6), p. 2369.
10. GOST R 52623.1–2008. *Tekhnologii vypolneniya prostykh meditsinskikh uslug funktsional'nogo obsledovaniya* [State standard R 52623.1–2008. Technologies of simple medical services for functional check-up]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200068115> (accessed 10.09.2025).
11. Mukaka M.M. Statistics corner: A guide to appropriate use of the correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 2012, vol. 24 (3), pp. 69–71.
12. Hastie T, Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. New York, Springer, 2009. 745 p.
13. Altmann A., Toloşi L., Sander O., Lengauer T. Permutation importance: A corrected feature importance measure. *Bioinformatics*, 2010, vol. 26 (10), pp. 1340–1347.
14. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, p. 2825.
15. Mikhailishin V.V., Smirnova L.M., Cherkashin S.O. Tsifrovaya obrabotka elektronnykh planoqram s primeneniem tekhnologii iskusstvennogo intellekta kak etap avtomatizatsii plantograficheskikh issledovaniy [Digital processing of electronic planograms using artificial intelligence technologies as a stage of automation of plantographic research]. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*, 2024, no. 3, pp. 19–24.

Для цитирования:

Прогнозирование высоты продольного свода стопы на основе плантографических показателей средствами искусственного интеллекта / В.А. Хазов, С.О. Черкашин, В.В. Михайлишин, Е.И. Скимонт, С.С. Полеева // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 3 (99). – С. 149–159. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-149-159.

For citation:

Khazov V.A., Cherkashin S.O., Mikhailishin V.V., Skirmont E.I., Poleeva S.S. Prognozirovanie vysoty prodol'nogo svoda stopy na osnove plantograficheskikh pokazatelei sredstvami iskusstvennogo intellekta [Prediction of the height of the longitudinal arch of the foot based on plantographic indicators by means of artificial intelligence]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2025, no. 3 (99), pp. 149–159. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-149-159.