



КОМБИНИРОВАННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭНДОСКОПИИ И НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ХИРУРГИИ ПОЗВОНОЧНИКА: СНИЖЕНИЕ ЛУЧЕВОЙ НАГРУЗКИ, ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДОСТУПА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ ИИ-АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ

Якубов Ахрор Туйчиевич

Клиника “Jacksoft”

Алиев Мансур Абдухоликович,

Турсунов Жахонгир Гулом угли,

Специализированный научно-практический центр нейрохирургии и нейрореабилитации при СамГМУ

Аннотация. Современная хирургия позвоночника характеризуется активным внедрением минимально инвазивных технологий, включая эндоскопические методы и системы интраоперационной 3D-навигации. Целью исследования явилась оценка эффективности комбинированного применения эндоскопии и интраоперационной навигации (флюороскопии и 3D-навигации) с точки зрения снижения лучевой нагрузки и повышения точности хирургического доступа, а также анализ перспектив интеграции алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в процесс сегментации анатомических структур. Проведён проспективный сравнительный анализ 128 пациентов, оперированных по поводу грыжи межпозвонкового диска и стеноза позвоночного канала. Установлено, что использование 3D-навигации достоверно снижает лучевую нагрузку (на 57,8%), уменьшает количество флюороскопических экспозиций и повышает точность позиционирования инструментов без значимого увеличения продолжительности операции. Применение алгоритма автоматической сегментации на основе сверточных нейронных сетей позволило сократить время предоперационного планирования и улучшить анатомическую регистрацию. Полученные данные подтверждают клиническую целесообразность интеграции навигационных и ИИ-технологий в высокоточную минимально инвазивную хирургию позвоночника.

Ключевые слова: эндоскопическая хирургия позвоночника, 3D-навигация, флюороскопия, лучевая нагрузка, искусственный интеллект, сегментация, конусно-лучевая КТ, точность позиционирования.

COMBINED USE OF ENDOSCOPY AND NAVIGATION TECHNOLOGIES IN SPINAL SURGERY: REDUCED RADIATION EXPOSURE, IMPROVED ACCURACY OF ACCESS, AND PROSPECTS FOR THE INTEGRATION OF AI SEGMENTATION ALGORITHMS

Yakubov Akhror Tuychiyevich

“Jacksoft” Clinic

Aliev Mansur Abdukholikovich,

Tursunov Jakhongir Gulom ugli

Specialized scientific and practical center for Neurosurgery and Neurorehabilitation at the Samarkand State Medical University

Abstract. Modern spine surgery is undergoing rapid technological transformation driven by minimally invasive techniques, high-resolution endoscopic systems, and intraoperative three-dimensional navigation platforms. The aim of this study was to evaluate the effectiveness of

combined endoscopic surgery and intraoperative navigation (fluoroscopy versus 3D navigation) in terms of radiation dose reduction and access accuracy, as well as to analyze the prospects of artificial intelligence (AI)-based segmentation integration. A prospective comparative analysis was conducted on 128 patients undergoing endoscopic surgery for lumbar disc herniation or spinal canal stenosis. The use of 3D navigation significantly reduced radiation exposure (by 57.8%), decreased the number of fluoroscopic images, and improved instrument positioning accuracy without a statistically significant increase in operative time. Implementation of a convolutional neural network-based automatic segmentation algorithm reduced preoperative planning time and enhanced anatomical registration accuracy. The findings support the clinical value of integrating navigation and AI technologies in precision minimally invasive spine surgery.

Keywords: endoscopic spine surgery, 3D navigation, fluoroscopy, radiation exposure, artificial intelligence, segmentation, cone-beam CT, positioning accuracy.

**UMMURTQA JARROHLIGIDA ENDOSKOPIYA VA NAVIGATSIYA
TEXNOLOGIYALARINI BIRGALIKDA QO'LLASH: NURLANISHGA TA'SIRNI
KAMAYTIRISH, KIRISH ANIQLIGINI OSHIRISH VA SUN'IY INTELLEKT
SEKTORLASHTIRISH ALGORITMLARINI INTEGRATSIYA QILISH
PERSPEKTIVALARI**

Yakubov Ahror Tuychiyevich

“Jacksoft” Klinikasi

Aliev Mansur Abduholiqovich,

Tursunov Jahongir Gulom o'g'li

Samarqand davlat tibbiyot universiteti huzuridagi Neyroxirurgiya va neyroeabilitatsiya
ixtisoslashtirilgan ilmiy-amaliy markazi

Annotatsiya. Zamonaviy umurtqa pog'onasi jarrohligi minimal invaziv texnologiyalar, endoskopik tizimlar hamda intraoperatsion 3D-navigatsiya platformalarini keng joriy etish bilan tavsiflanadi. Tadqiqotning maqsadi – endoskopiya va intraoperatsion navigatsiyaning (flyuoroskopiya va 3D-navigatsiya) kombinatsiyalangan qo'llanilishining samaradorligini baholash, ya'ni nur yuklamasini kamaytirish va jarrohlik kirish aniqligini oshirish, shuningdek sun'iy intellekt (SI) asosidagi segmentatsiya algoritmlarini integratsiya qilish istiqbollarini tahlil qilishdan iborat. 128 nafar bemor ishtirokida disk churrasi va umurtqa kanali stenozi bo'yicha bajarilgan endoskopik operatsiyalar yuzasidan prospektiv taqqoslovchi tahlil o'tkazildi. 3D-navigatsiya qo'llanilganda nur yuklamasi 57,8% ga kamaygani, flyuoroskopik tasvirlar soni qisqargani va instrument joylashtirish aniqligi oshgani aniqlanib, operatsiya davomiyligi sezilarli darajada uzaymaganligi qayd etildi. Konvolyutsion neyron tarmoqlar asosidagi avtomatik segmentatsiya algoritmi operatsiyagacha rejalashtirish vaqtini qisqartirdi va anatomik registratsiya aniqligini yaxshiladi. Olingan natijalar yuqori aniqlikdagi minimal invaziv umurtqa jarrohligida navigatsiya va sun'iy intellekt texnologiyalarini integratsiya qilish klinik jihatdan maqsadga muvofiq ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: endoskopik umurtqa jarrohligi, 3D-navigatsiya, flyuoroskopiya, nur yuklamasi, sun'iy intellekt, segmentatsiya, konus-nurli KT, pozitsion aniqlik.

Введение. Современная хирургия позвоночника переживает этап интенсивной технологической трансформации, связанной с внедрением минимально инвазивных методик, эндоскопических систем высокого разрешения и навигационных платформ с трехмерной реконструкцией. Эндоскопическая хирургия позвоночника доказала свою эффективность при лечении грыж межпозвонковых дисков, стеноза позвоночного канала и фасеточных синдромов, обеспечивая минимальную травматизацию паравerteбральных структур и ускоренную реабилитацию пациентов [1]. Однако выполнение эндоскопических вмешательств требует высокой точности позиционирования инструментов, что традиционно достигается с помощью интраоперационной флюороскопии. Повторные рентгенологические

экспозиции при флюороскопическом контроле сопряжены с накопительной лучевой нагрузкой как для пациента, так и для операционной бригады. По данным дозиметрических исследований, суммарная эффективная доза при эндоскопической дискэктомии может варьировать от 1,5 до 5,0 мЗв в зависимости от продолжительности вмешательства и опыта хирурга [3]. В условиях многократных операций годовая профессиональная экспозиция может приближаться к предельно допустимым значениям [6]. В этой связи активно развивается применение интраоперационной 3D-навигации и систем компьютерно-ассистированной хирургии, позволяющих снизить количество флюороскопических снимков и повысить пространственную точность доступа. Использование конусно-лучевой компьютерной томографии (СВСТ), O-arm и оптических трекингвых систем обеспечивает трехмерную визуализацию анатомических ориентиров в режиме реального времени [4]. Навигационные технологии позволяют достигать точности позиционирования инструментов до 1–2 мм, что особенно важно при работе в узких анатомических пространствах [8]. Перспективным направлением является интеграция алгоритмов искусственного интеллекта и автоматической сегментации костных и нейральных структур на основе методов глубокого обучения, включая сверточные нейронные сети (CNN) и архитектуры типа U-Net [2]. Такие системы способны ускорять процесс планирования доступа и снижать вероятность ятрогенных осложнений.

Цель исследования. Оценка эффективности комбинированного применения эндоскопии и интраоперационной навигации (флюороскопия и 3D-навигация) в хирургии позвоночника с точки зрения снижения лучевой нагрузки и повышения точности доступа, а также в анализе перспектив интеграции ИИ-алгоритмов сегментации.

Материалы и методы. Исследование выполнено в формате проспективного сравнительного анализа на базе нейрохирургического центра Самаркандского государственного медицинского университета в 2023–2025 гг. В исследование включены 128 пациентов, которым выполнялись эндоскопические вмешательства по поводу грыжи межпозвонкового диска или стеноза позвоночного канала. Пациенты были разделены на две группы. В первой группе (n=64) использовалась стандартная интраоперационная флюороскопия. Во второй группе (n=64) применялась комбинированная технология: эндоскопия с интраоперационной 3D-навигацией на основе конусно-лучевой томографии и оптической трекинговой системы.



а



б

Графическое изображение флюороскопии (а) и интраоперационной 3D-навигации

Перед началом операции во второй группе выполнялась 3D-реконструкция операционного сегмента. На основании полученных данных формировалась навигационная модель с автоматической регистрацией анатомических ориентиров. В экспериментальной подгруппе (n=20) дополнительно применялся прототип алгоритма автоматической сегментации позвоночных структур, реализованный на основе CNN.

Оценивались следующие параметры: суммарная лучевая нагрузка (мЗв), количество флюороскопических снимков, точность позиционирования инструмента (по данным послеоперационной КТ), длительность операции и частота осложнений.

Статистический анализ проводился с использованием пакета SPSS 26.0. Для сравнения средних значений использовался t-критерий Стьюдента. Статистическая значимость устанавливалась при $p < 0,05$.

Результаты. Средний возраст пациентов составил $47,2 \pm 13,6$ лет. Уровень вмешательства L4–L5 наблюдался в 58% случаев, L5–S1 — в 32%, шейный отдел — в 10%.

Таблица 1. Сравнение параметров в группах

Показатель	Флюороскопия	3D-навигация	p
Лучевая нагрузка (мЗв)	$3,8 \pm 1,2$	$1,6 \pm 0,7$	$<0,001$
Количество снимков	21 ± 6	7 ± 3	$<0,001$
Точность (мм отклонения)	$2,4 \pm 0,8$	$1,1 \pm 0,4$	$<0,01$
Длительность операции (мин)	72 ± 15	79 ± 17	0,07

Снижение лучевой нагрузки во второй группе составило 57,8%. Точность позиционирования инструмента достоверно повысилась. Различия по длительности операции статистически незначимы.

ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ДИНАМИКИ ЛУЧЕВОЙ НАГРУЗКИ



Применение алгоритма ИИ-сегментации позволило сократить время предоперационного планирования на 28% и повысить точность анатомической регистрации.

Обсуждение. Полученные данные подтверждают, что интеграция 3D-навигации в эндоскопическую хирургию позвоночника значительно снижает лучевую нагрузку и повышает пространственную точность доступа. Это особенно актуально при выполнении повторных вмешательств и работе в анатомически сложных зонах [4].

Флюороскопия остаётся доступным и экономически оправданным методом, однако её использование ограничено необходимостью многократных экспозиций [3]. 3D-навигация позволяет минимизировать количество снимков и обеспечивает более стабильный контроль положения инструмента [8].

Перспективы внедрения ИИ-алгоритмов сегментации представляются многообещающими. Автоматическое выделение позвоночных структур ускоряет планирование и снижает зависимость от субъективного опыта хирурга [2]. В будущем возможна интеграция навигации с роботизированными системами.

Ограничениями исследования являются одноцентровый характер и относительно небольшой объем выборки для анализа ИИ-модуля.

Заключение. Комбинированное применение эндоскопии и 3D-навигационных технологий в хирургии позвоночника обеспечивает значительное снижение лучевой нагрузки и повышение точности хирургического доступа. Интеграция алгоритмов искусственного интеллекта и автоматической сегментации является перспективным направлением развития высокоточной нейрохирургии и может способствовать стандартизации минимально инвазивных вмешательств.

Литература

1. Ahn, Y. (2016). Endoscopic spine surgery. *World Neurosurgery*, 95, 630–637.
2. Chen, H., et al. (2019). Deep learning in spinal imaging. *Journal of Spine Surgery*, 5(2), 200–210.
3. Deyo, R. A., et al. (2015). Radiation exposure in spine surgery. *Spine Journal*, 15(5), 987–995.
4. Elmi-Terander, A., et al. (2016). Navigation in spine surgery. *Spine*, 41(21), E1300–E1306.
5. Fehlings, M. G., et al. (2017). Technological advances in spine surgery. *Neurosurgery*, 80(3S), S1–S5.
6. Rampersaud, Y. R., et al. (2000). Occupational radiation exposure. *Spine*, 25(20), 2637–2645.
7. Ruetten, S., et al. (2008). Full-endoscopic spinal surgery. *Spine*, 33(9), 931–939.
8. Shin, B. J., et al. (2017). Accuracy of navigated spine surgery. *European Spine Journal*, 26(2), 303–309.
9. Юсупов, Ш. (2022). Минимально инвазивная хирургия позвоночника в Узбекистане. *Медицинский журнал Узбекистана*, 4, 25–30.