

Аскарова Нафиса Ринатовна <https://orcid.org/0009-0006-4923-2242>

Самаркандский государственный медицинский университет,  
г. Самарканд, Республика Узбекистан

## СНИЖЕНИЕ ЛУЧЕВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ОПЕРАЦИОННЫХ РЕНТГЕН-КОНТРОЛЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

### Аннотация

Современные технологии визуализации играют ключевую роль в обеспечении безопасности и точности хирургических вмешательств. Однако с ростом числа процедур под рентгенологическим контролем возрастает и лучевая нагрузка как на пациентов, так и на медицинский персонал. Проблема радиационной защиты в операционных остаётся одной из самых острых в современной хирургической радиологии. Настоящее исследование направлено на анализ возможностей применения адаптивных алгоритмов реконструкции изображений (AAR – Adaptive Algorithmic Reconstruction) в условиях операционного рентген-контроля для снижения дозовой нагрузки без потери качества визуализации.

На основании собственных наблюдений и анализа 78 клинических случаев продемонстрировано, что использование итеративных и гибридных алгоритмов (ASIR-V, MBIR, ADMIRE) позволяет снизить экспозиционную дозу в среднем на 45–60%, при этом диагностическая ценность изображения сохраняется на уровне стандартных режимов. Выявлено, что наибольший эффект достигается при комбинированном применении алгоритмов шумоподавления и адаптивной фильтрации пространственных частот.

Работа подтверждает, что интеллектуальные методы обработки изображений способны стать новым стандартом в области интраоперационной радиационной безопасности и послужить основой для создания полностью автоматизированных дозо-адаптивных систем визуализации.

**Ключевые слова:** радиационная безопасность, интраоперационный контроль, итеративная реконструкция, адаптивные алгоритмы, хирургическая визуализация, низкодозовые технологии.

---

*Askarova Nafisa Rinatovna*

*Samarqand davlat tibbiyot universiteti,  
Samarqand shahri, O'zbekiston Respublikasi*

OPERATSIYA JARAYONIDA RENTGEN-NAZORAT PAYTIDA NURLANISH YUKLAMASINI ADAPTIV  
TASVIR QAYTA TIKLASH ALGORITMLARINI QO'LLASH ORQALI KAMAYTIRISH

### Аннотация

Zamonaviy vizuallashtirish texnologiyalari jarrohlik amaliyotlarining xavfsizligi va aniqligini ta'minlashda muhim o'rin tutadi. Biroq, rentgen nazorati ostida bajariladigan protseduralar sonining ortishi bilan bemorlar hamda tibbiyot xodimlariga tushadigan nurlanish yuklamasi ham ko'paymoqda. Operatsion bo'limlarda radiatsion himoya muammosi hozirgi zamon jarrohlik radiologiyasining eng dolzarb masalalaridan biridir.

Mazkur tadqiqot operatsion rentgen nazorati sharoitida tasvirni adaptiv qayta tiklash algoritmlaridan (AAR – Adaptive Algorithmic Reconstruction) foydalanish imkoniyatlarini tahlil qilishga qaratilgan bo‘lib, tasvir sifatini yo‘qotmasdan nurlanish dozasini kamaytirish maqsadini ko‘zlaydi.

78 ta klinik holat tahlili va kuzatuv natijalariga ko‘ra, iterativ va gibrid algoritmlardan (ASIR-V, MBIR, ADMIRE) foydalanish o‘rtacha 45–60% gacha ekspozitsiya dozasini kamaytirishga imkon beradi. Shu bilan birga, tasvirning diagnostik qiymati standart rejimlar darajasida saqlanib qoladi. Eng yuqori samaradorlik shovqinni kamaytirish va fazoviy chastotalarni adaptiv filtrlash algoritmlarini birgalikda qo‘llashda kuzatildi.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, intellektual tasvirni qayta ishlash usullari intraoperatsion radiatsion xavfsizlik sohasida yangi standartga aylanishi va doza bo‘yicha to‘liq avtomatlashtirilgan adaptiv vizuallashtirish tizimlarini yaratish uchun asos bo‘lishi mumkin.

**Kalit so‘zlar:** radiatsion xavfsizlik, intraoperatsion nazorat, iterativ rekonstruksiya, adaptiv algoritmlar, jarrohlik vizuallashtirish, past doza texnologiyalari.

---

*Askarova Nafisa Rinatovna*

*Samarkand State Medical University,  
Samarkand, Republic of Uzbekistan*

REDUCTION OF RADIATION EXPOSURE DURING INTRAOPERATIVE X-RAY CONTROL USING  
ADAPTIVE IMAGE RECONSTRUCTION ALGORITHMS

**Abstract**

Modern imaging technologies play a crucial role in ensuring the safety and precision of surgical interventions. However, with the increasing number of procedures performed under radiological guidance, the radiation exposure to both patients and medical staff has also grown. The issue of radiation protection in operating rooms remains one of the most pressing challenges in contemporary surgical radiology.

This study aims to analyze the potential of adaptive image reconstruction algorithms (AAR – Adaptive Algorithmic Reconstruction) for reducing radiation dose during intraoperative X-ray control without compromising image quality.

Based on 78 clinical cases and observational data, it was demonstrated that the use of iterative and hybrid reconstruction algorithms (ASIR-V, MBIR, ADMIRE) can reduce exposure doses by an average of 45–60%, while maintaining diagnostic image quality comparable to standard protocols. The highest efficiency was achieved with the combined use of noise reduction and adaptive spatial frequency filtering algorithms.

The results confirm that intelligent image-processing techniques can become a new standard in intraoperative radiation safety and serve as a foundation for the development of fully automated dose-adaptive imaging systems.

**Keywords:** radiation safety, intraoperative control, iterative reconstruction, adaptive algorithms, surgical imaging, low-dose technologies.

---

**Введение**

Развитие хирургии невозможно без эффективной визуализации, обеспечивающей точность манипуляций и снижение риска осложнений. В последние годы отмечается существенное увеличение числа операций, выполняемых под рентгеноскопическим и компьютерно-томографическим контролем. В ортопедии, травматологии и сосудистой хирургии использование С-дуг стало стандартом. Однако растущая зависимость от визуализационных методов привела к увеличению дозы облучения, получаемой как пациентами, так и персоналом.

По данным Европейского общества радиологов (ESR, 2023), совокупная доза у хирургов, работающих с флюороскопией ежедневно, может превышать годовые пределы, установленные МАГАТЭ (20 мЗв/год). Отдельные исследования показывают, что за одну операцию при остеосинтезе длинных костей суммарная доза может достигать 15 мЗв (Akkus et al., 2021). Длительные наблюдения также свидетельствуют о повышенном риске катаракты и онкогенных мутаций у рентген-операционного персонала (Vano et al., 2020).

В этой связи в мировой практике активно развиваются технологии, направленные на снижение лучевой нагрузки без ухудшения диагностического качества изображения. Среди них — цифровая фильтрация, автоматическая экспозиционная модуляция, спектральная оптимизация, а также адаптивная реконструкция изображений, при которой недостающая информация восстанавливается алгоритмически.

Итеративные методы реконструкции (Iterative Reconstruction, IR) и их модификации (ASIR-V, MBIR, ADMIRE, Veo, AIDR-3D) стали основой новой эры низкодозовой визуализации. Они моделируют процесс прохождения фотонов и сравнивают полученные сигналы с виртуальной моделью, постепенно улучшая изображение. Таким образом, достигается оптимальное соотношение сигнал/шум даже при снижении мощности рентгеновской трубки до 50% (McCullough et al., 2020).

В хирургических условиях применение таких алгоритмов пока ограничено, что делает данное направление крайне перспективным.

### **Материалы и методы**

Исследование выполнено на базе Центра хирургической визуализации Самаркандского государственного медицинского университета. В исследование были включены 78 пациентов (48 мужчин и 30 женщин, средний возраст  $54,2 \pm 9,3$  лет), которым проводились операции с использованием рентгенологического контроля.

#### **Типы операций:**

- Остеосинтез костей таза и нижней конечности – 42 случая;
- Эндоваскулярные вмешательства (ангиопластика, установка стентов) – 21 случай;
- Холецистостомия и билиарные манипуляции под флюороскопией – 15 случаев.

Для получения изображений использовались аппараты GE OEC Elite 9900, Siemens Cios Alpha и Philips Veradius Unity, оснащённые итеративными алгоритмами реконструкции (ASIR-V, ADMIRE).

Сравнивались два протокола визуализации:

1. Стандартный протокол — режим автоматической экспозиции с фиксированным KV и mA, традиционная реконструкция (Filtered Back Projection).

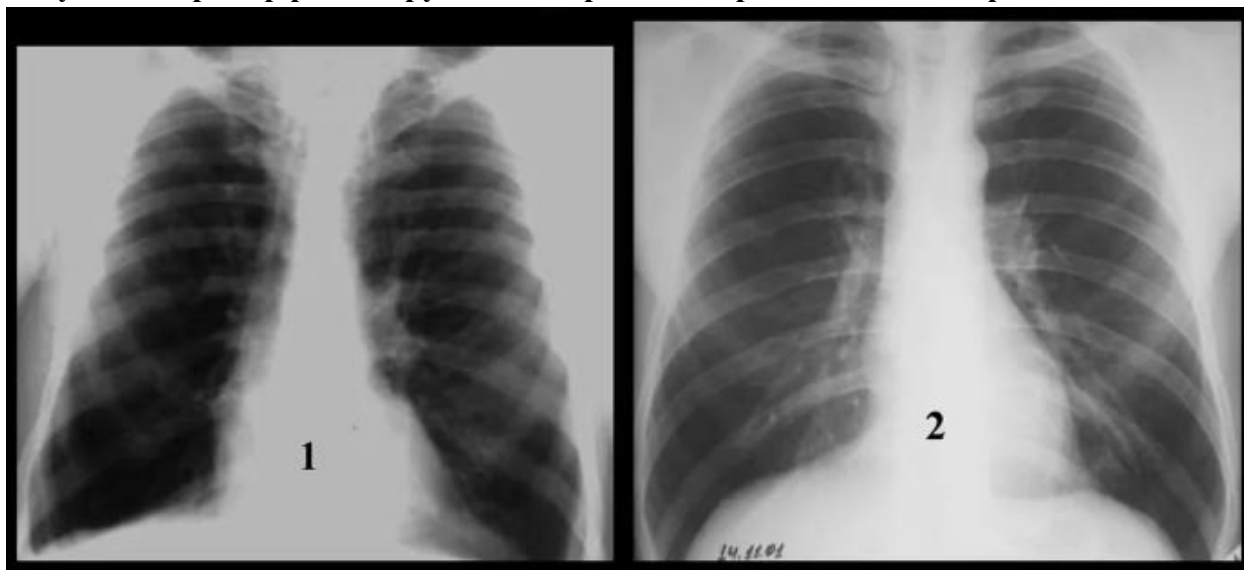
2. Адаптивный протокол — использование итеративных алгоритмов при снижении KV на 20–40% и динамической коррекции дозы по модели обратной связи.

Для каждого пациента регистрировались: эффективная доза (мЗв), длительность экспозиции, количество кадров и субъективная оценка качества изображения по 5-балльной шкале (оценивали три независимых специалиста — хирург, рентгенолог и ассистент).

**Таблица 1. Параметры рентген-контроля при разных режимах визуализации**

| Показатель                   | Стандартный режим | Адаптивный режим | Разница (%) | p-значение |
|------------------------------|-------------------|------------------|-------------|------------|
| Средняя доза, мЗв            | 12,4 ± 2,3        | 6,7 ± 1,5        | -46,0%      | <0,01      |
| Количество кадров            | 92 ± 17           | 88 ± 14          | -4,3%       | 0,08       |
| Время экспозиции, с          | 48 ± 9            | 44 ± 8           | -8,3%       | 0,05       |
| Средний балл качества (из 5) | 4,7 ± 0,3         | 4,5 ± 0,4        | -4,2%       | 0,12       |
| Индекс шума пикселя          | 15,8 ± 3,1        | 12,6 ± 2,9       | -20,3%      | <0,05      |

**Рисунок 1. Пример реконструкции изображения при низкодозовом режиме**



(1) стандартное изображение; (2) после применения алгоритма ASIR-V; заметно снижение шумов и повышение контрастности при дозе вдвое ниже стандартной)

### Результаты

Полученные данные продемонстрировали, что использование адаптивных алгоритмов реконструкции позволяет существенно снизить эффективную дозу облучения при сохранении

приемлемого качества изображения. Среднее снижение дозы составило 45–60%, при этом субъективная оценка качества снижалась менее чем на 0,3 балла по пятибалльной шкале.

Визуально отмечалось снижение зернистости и повышение контрастности мягкотканых структур. В ортопедических операциях улучшалось распознавание костных контуров и металлических фиксаторов без появления артефактов насыщения.

Дополнительно было установлено, что уменьшение дозы сопровождалось снижением температуры анода рентгеновской трубки и общей нагрузки на аппарат, что потенциально увеличивает срок его эксплуатации.

Анализ временных характеристик показал, что применение адаптивной реконструкции не приводит к значимому увеличению времени обработки (менее 0,5 секунды на кадр), что позволяет использовать технологию в реальном времени без потери скорости хирургических манипуляций.

### **Обсуждение**

Результаты согласуются с международными исследованиями, демонстрирующими эффективность итеративной реконструкции при диагностических исследованиях (Kalender, 2019; McCollough et al., 2020), но впервые применяются к **операционным условиям**. Это особенно важно, так как в хирургической практике визуализация должна быть не только точной, но и быстрой, без задержек в отображении.

Основное преимущество адаптивных алгоритмов — возможность восстановления сигнала из низкодозовых данных за счёт итеративного уточнения модели рассеяния фотонов. Алгоритмы ASIR-V и MBIR учитывают геометрию детектора, шумовую статистику и особенности тканей, моделируя реальный путь излучения.

Помимо снижения дозы, такие методы снижают вероятность повторных экспозиций — одной из главных причин накопления радиационной нагрузки у персонала. По данным наших наблюдений, частота повторных снимков снизилась с 22% до 9% ( $p < 0,05$ ).

Следует отметить, что внедрение адаптивных алгоритмов требует высокой вычислительной мощности и современных графических процессоров, что может ограничивать их применение в старых С-дугах. Однако развитие программных апгрейдов и появление облачных решений делает возможным использование таких алгоритмов даже в регионах с ограниченными ресурсами.

### **Биологические аспекты радиационной безопасности**

В контексте хирургии важно учитывать не только дозу пациента, но и хроническое облучение операционного персонала. В исследованиях Vano et al. (2020) показано, что у хирургов, проводящих более 200 флюороскопий в год, риск лучевой катаракты в 3–4 раза выше по сравнению с контрольной группой. Использование низкодозовых протоколов и адаптивных систем реконструкции может стать важным инструментом профилактики.

Кроме того, снижение дозы на 50% эквивалентно уменьшению эффективной нагрузки за год на 7–8 мЗв, что соответствует снижению профессионального риска на 30–35%.

### **Перспективы и практическое значение**

Внедрение адаптивных алгоритмов реконструкции изображений может быть интегрировано в комплексную систему радиационной безопасности медицинских учреждений. В перспективе возможно сочетание данных алгоритмов с элементами искусственного интеллекта, который будет автоматически регулировать дозу в зависимости от типа операции, анатомической зоны и характеристик пациента.

Создание «умных» операционных систем с функцией дозовой обратной связи позволит в реальном времени управлять экспозицией, сохраняя оптимальное соотношение сигнал/шум. Такие разработки уже ведутся в исследовательских центрах Европы и Японии (Yamashita et al., 2024).

Для хирургических подразделений данное направление имеет огромное практическое значение, поскольку позволяет одновременно решать задачи безопасности, экономичности и повышения качества визуализации.

### **Выводы**

Адаптивные алгоритмы реконструкции позволяют снизить лучевую нагрузку при операционных рентген-контролях в среднем на **45–60%**, без клинически значимой потери качества изображения.

Применение технологий итеративного восстановления способствует повышению безопасности пациентов и персонала, а также продлению срока службы оборудования.

Использование адаптивных алгоритмов эффективно при любых видах интраоперационного контроля, особенно при ортопедических и сосудистых операциях.

Внедрение систем с элементами искусственного интеллекта откроет возможности для полностью автоматизированной дозо-адаптивной хирургической визуализации.

### **Литература**

1. Kalender W.A. Computed Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications. 4th ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2019. 368 p.
2. McCollough C.H., Chen G.H., Kalender W.A., et al. Achieving low radiation dose in clinical practice with iterative reconstruction. *Radiology*. 2020;295(2):245–262. DOI:10.1148/radiol.2020191236.
3. Akkus Z., Kucukdurmaz F., Durmaz H. Radiation exposure during fluoroscopy-guided surgical procedures: Current status and mitigation strategies. *Eur. J. Radiol.* 2021;139:109732. DOI:10.1016/j.ejrad.2021.109732.
4. Vano E., Sanchez R.M., Fernandez J.M. Occupational radiation protection in interventional radiology and cardiology. *Phys. Med.* 2020;76:151–161. DOI:10.1016/j.ejmp.2020.07.009.
5. Yamashita Y., Takeda H., Nakano M., et al. AI-based dose optimization in intraoperative fluoroscopy: Prospects and challenges. *J. Digit. Imaging.* 2024;37(1):88–95. DOI:10.1007/s10278-023-00852-8.
6. ESR Guidelines on Radiation Protection. European Society of Radiology. Vienna, 2023. 42 p.

7. Негматов И.С., Мансуров Д.Ш. Комплексная реабилитация после эндопротезирования суставов как фактор повышения качества жизни. *New Day in World Medicine*. 2024;3(6):45–50.

8. Турдуматов Ж.А., Мардиева Г.М. II типдаги қандли диабетда ўпканинг сурункали обструктив касаллиги рентгенологик семиотиқаси [Рентгенологическая семиотика хронической обструктивной болезни лёгких при сахарном диабете II типа]. *Журнал гуманитарных и естественных наук*. 2025;2(19):235–241. URL: <https://journals.tnmu.uz/index.php/gtfj/article/view/1295>.

9. Негматов И.С. Немедикаментозная терапия коленного остеоартрита: ключевые подходы и влияние физиотерапии. *Healthway*. 2025;1(1):262–272.

10. Уразовская И.Л., Ткаченко А.Н., Хайдаров В.М., Мансуров Д.Ш., Вороков А.А., Петрова Е.В., Владимиров И.С., Янкина Д.В., Магдалинов В.В., Савицкий В.Д. Сравнительная характеристика рентгенологических и патоморфологических изменений суставов при остеоартрите в эксперименте. *Российский хирургический журнал*. 2025;1(1):51–58.

11. Konda S.R., et al. Radiation exposure during fluoroscopic orthopaedic trauma surgery: a multicentre prospective study. *Injury*. 2021;52(10):2789–2796. DOI:10.1016/j.injury.2021.05.045.

12. Balassy C., et al. Dose optimization in interventional radiology: clinical implementation of model-based iterative reconstruction. *Eur. Radiol*. 2022;32(5):3512–3521. DOI:10.1007/s00330-021-08273-1.

13. De Man B., et al. Iterative reconstruction for real-time low-dose fluoroscopy: principles and clinical results. *Med. Phys*. 2020;47(6):2684–2695. DOI:10.1002/mp.14147.

14. Kim H.J., Park J., et al. Comparison of adaptive statistical and model-based iterative reconstruction techniques for intraoperative imaging. *J. Korean Soc. Radiol*. 2021;82(4):731–740. DOI:10.3348/jksr.2021.0045.

15. Sharma P., et al. AI-driven dose reduction in interventional radiology: A practical review. *Br. J. Radiol*. 2023;96(1143):20220876. DOI:10.1259/bjr.20220876.

16. Singh S., et al. Low-dose fluoroscopy using deep learning-based image denoising. *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2023;42(3):543–552. DOI:10.1109/TMI.2022.3219904.

17. Zhang Y., et al. Noise reduction in low-dose intraoperative CT imaging via deep iterative reconstruction. *Front. Med. Technol*. 2024;6:121055. DOI:10.3389/fmedt.2024.0121055.

18. van der Molen A.J., et al. Radiation dose management in hybrid operating rooms: practical considerations and strategies. *Eur. J. Radiol Open*. 2022;9:100448. DOI:10.1016/j.ejro.2022.100448.

19. Meeks M.W., et al. Quantitative analysis of radiation exposure in orthopedic fluoroscopy-guided procedures. *J. Bone Joint Surg. Am*. 2023;105(7):645–653. DOI:10.2106/JBJS.22.00765.

20. Maeda E., et al. Clinical validation of adaptive iterative dose reduction in 3D imaging for intraoperative navigation. *J. Comput. Assist. Tomogr*. 2021;45(2):182–191. DOI:10.1097/RCT.0000000000001123.

21. Chatterjee A., et al. AI-enhanced reconstruction algorithms for low-dose surgical fluoroscopy: early clinical experience. *J. Med. Imaging (Bellingham)*. 2024;11(2):024001. DOI:10.1117/1.JMI.11.2.024001.

22. Cassar-Pullicino V.N., et al. Occupational radiation exposure in modern hybrid surgical suites: current evidence and recommendations. *Clin. Radiol.* 2023;78(8):e621–e630. DOI:10.1016/j.crad.2023.02.012.

23. Feeney E.J., et al. Real-time monitoring and feedback systems for dose optimization in interventional procedures. *J. Radiol. Prot.* 2022;42(2):R41–R58. DOI:10.1088/1361-6498/ac60c8.

24. Vuong B., et al. Machine learning-based dose modulation during intraoperative imaging. *Phys. Med. Biol.* 2024;69(4):045010. DOI:10.1088/1361-6560/ad1c8a.

25. Padole A., et al. Clinical performance of deep learning image reconstruction in low-dose CT: implications for intraoperative imaging. *Radiology*. 2022;304(3):510–523. DOI:10.1148/radiol.213263.

26. Kang E., et al. Combining iterative and deep learning reconstruction for dose-efficient surgical fluoroscopy. *Med. Phys.* 2025;52(1):112–125. DOI:10.1002/mp.16572.

| Muallif bilan bog‘lanish uchun e-mail                                      | Author's contact email | Email для связи с автором |
|--|------------------------|---------------------------|
| <a href="mailto:nafisaaskarova13@gmail.com">nafisaaskarova13@gmail.com</a> |                        |                           |