



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Искусственный интеллект в медицинской физике

*Функции, обязанности, образование и подготовка
медицинских физиков клинической квалификации*

*Одобрено Американской ассоциацией
физиков в медицине*

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
В МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКЕ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

АВСТРАЛИЯ	ЙЕМЕН	ПОЛЬША
АВСТРИЯ	КАБО-ВЕРДЕ	ПОРТУГАЛИЯ
АЗЕРБАЙДЖАН	КАЗАХСТАН	РЕСПУБЛИКА МОЛДОВА
АЛБАНИЯ	КАМБОДЖА	РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
АЛЖИР	КАМЕРУН	РУАНДА
АНГОЛА	КАНАДА	РУМЫНИЯ
АНТИГУА И БАРБУДА	КАТАР	САЛЬВАДОР
АРГЕНТИНА	КЕНИЯ	САМОА
АРМЕНИЯ	КИПР	САН-МАРИНО
АФГАНИСТАН	КИТАЙ	САУДОВСКАЯ АРАВИЯ
БАГАМСКИЕ ОСТРОВА	КОЛУМБИЯ	СВЯТОЙ ПРЕСТОЛ
Бангладеш	КОМОРСКИЕ ОСТРОВА	СЕВЕРНАЯ МАКЕДОНИЯ
БАРБАДОС	КОНГО	СЕЙШЕЛЬСКИЕ ОСТРОВА
БАХРЕЙН	КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	СЕНЕГАЛ
БЕЛАРУСЬ	КОСТА-РИКА	СЕНТ-ВИНСЕНТ И ГРЕНАДИНЫ
БЕЛИЗ	КОТ-Д'ИВУАР	СЕНТ-КИТС И НЕВИС
БЕЛЬГИЯ	КУБА	СЕНТ-ЛЮСИЯ
БЕНИН	КУВЕЙТ	СЕРБИЯ
БОЛГАРИЯ	КЫРГЫЗСТАН	СИНГАПУР
БОЛИВИЯ, МНОГОНАЦИОНАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВО	ЛАОССКАЯ НАРОДНО- ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА
БОСНИЯ И ГЕРЦЕГОВИНА	ЛАТВИЯ	СЛОВАКИЯ
БОТСВАНА	ЛЕСОТО	СЛОВЕНИЯ
БРАЗИЛИЯ	ЛИБЕРИЯ	СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО ВЕЛИКОБРИТАНИИ И СЕВЕРНОЙ ИРЛАНДИИ
БРУНЕЙ-ДАРУССАЛАМ	ЛИВАН	СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ
БУРКИНА-ФАСО	ЛИВИЯ	СУДАН
БУРУНДИ	ЛИТВА	СЬЕРРА-ЛЕОНЕ
ВАНУАТУ	ЛИХТЕНШТЕЙН	ТАДЖИКИСТАН
ВЕНГРИЯ	ЛЮКСЕМБУРГ	ТАИЛАНД
ВЕНЕСУЭЛА, БОЛИВАРИАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	МАВРИКИЙ	ТОГО
ВЬЕТНАМ	МАВРИТАНИЯ	ТОНГА
ГАБОН	МАДАГАСКАР	ТРИНИДАД И ТОБАГО
ГАИТИ	МАЛАВИ	ТУНИС
ГАЙАНА	МАЛАЙЗИЯ	ТУРКМЕНИСТАН
ГАМБИЯ	МАЛИ	ТУРЦИЯ
ГАНА	МАЛЬТА	УГАНДА
ГВАТЕМАЛА	МАРОККО	УЗБЕКИСТАН
ГВИНЕЯ	МАРШАЛЛОВЫ ОСТРОВА	УКРАИНА
ГЕРМАНИЯ	МЕКСИКА	УРУГВАЙ
ГОНДУРАС	МОЗАМБИК	ФИДЖИ
ГРЕНАДА	МОНАКО	ФИЛИППИНЫ
ГРЕЦИЯ	МОНГОЛИЯ	ФИНЛЯНДИЯ
ГРУЗИЯ	МЬЯНМА	ФРАНЦИЯ
ДАНИЯ	НАМИБИЯ	ХОРВАТИЯ
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА КОНГО	НЕПАЛ	ЦЕНТРАЛЬНОАФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ДЖИБУТИ	НИГЕР	ЧАД
ДОМИНИКА	НИГЕРИЯ	ЧЕРНОГОРИЯ
ДОМИНИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	НИДЕРЛАНДОВ, КОРОЛЕВСТВО	ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ЕГИПЕТ	НИКАРАГУА	ЧИЛИ
ЗАМБИЯ	НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ	ШВЕЙЦАРИЯ
ЗИМБАБВЕ	НОРВЕГИЯ	ШВЕЦИЯ
ИЗРАИЛЬ	ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕСПУБЛИКА ТАНЗАНИЯ	ШРИ-ЛАНКА
ИНДИЯ	ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ	ЭКВАДОР
ИНДОНЕЗИЯ	ОМАН	ЭРИТРЕЯ
ИОРДАНИЯ	ПАКИСТАН	ЭСВАТИНИ
ИРАК	ПАЛАУ	ЭСТОНИЯ
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	ПАНАМА	ЭФИОПИЯ
ИРЛАНДИЯ	ПАПУА — НОВАЯ ГВИНЕЯ	ЮЖНАЯ АФРИКА
ИСЛАНДИЯ	ПАРАГВАЙ	ЯМАЙКА
ИСПАНИЯ	ПЕРУ	ЯПОНИЯ
ИТАЛИЯ		

Устав Агентства был утвержден 23 октября 1956 года на Конференции по выработке Устава МАГАТЭ, которая состоялась в Центральных учреждениях Организации Объединенных Наций в Нью-Йорке. Устав вступил в силу 29 июля 1957 года. Центральные учреждения Агентства находятся в Вене. Главной целью Агентства является достижение «более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире».

СЕРИЯ УЧЕБНЫХ КУРСОВ, № 83

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКЕ

ФУНКЦИИ, ОБЯЗАННОСТИ, ОБРАЗОВАНИЕ
И ПОДГОТОВКА МЕДИЦИНСКИХ ФИЗИКОВ
КЛИНИЧЕСКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ

ОДОБРЕНО АМЕРИКАНСКОЙ АССОЦИАЦИЕЙ
ФИЗИКОВ В МЕДИЦИНЕ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

ВЕНА, 2025 год

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены положениями Всемирной конвенции об авторском праве, принятой в 1952 году (Женева) и пересмотренной в 1971 году (Париж). Впоследствии авторские права были распространены Всемирной организацией интеллектуальной собственности (Женева) также на интеллектуальную собственность в электронной и виртуальной форме. Для полного или частичного использования текстов, содержащихся в печатных или электронных публикациях МАГАТЭ, может потребоваться разрешение. Более подробная информация приводится на странице <https://www.iaea.org/ru/publikacii/prava-i-razresheniya>. Вопросы следует направлять по адресу:

Издательская секция (Publishing Section)
Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр
а/я 100
1400 Вена, Австрия
тел.: +43 1 2600 22529 или 22530
эл. почта: sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/ru/publikacii>

Для получения дополнительной информации об этой публикации
просьба обращаться по адресу:

Секция дозиметрии и медицинской радиационной физики
Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
Эл. почта: Official.Mail@iaea.org

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКЕ

МАГАТЭ, ВЕНА, 2025 ГОД
IAEA-TCS-83
ISSN 2710-3323

© МАГАТЭ, 2025

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Март 2025 года

ПРЕДИСЛОВИЕ

В ближайшие 5–10 лет можно ожидать все более широкого внедрения технологий, основанных на искусственном интеллекте (ИИ), в сфере медицинского использования излучений (т.е. радиационной онкологии, диагностической визуализации и ядерной медицине) и в медицинской физике. Предполагается, что медицинские физики клинической квалификации будут играть важную роль в обеспечении безопасного и эффективного клинического применения инструментов на основе ИИ.

Использование ИИ в радиационной и медицинской физике было предметом обсуждения на техническом совещании по искусственному интеллекту для ядерных технологий и применений, организованном МАГАТЭ в 2021 году. Эксперты в составе рабочих групп по различным применениям в области здоровья человека определили возможности внедрения ИИ и обсудили потенциальные проблемы в этой связи. Эксперты указали на необходимость разработки руководства по использованию ИИ в области медицинской физики.

На 19-м двухгодичном совещании Научного комитета ДЛВЭ (SSC-19) по оценке и рекомендациям по программе дозиметрии и сети ДЛВЭ МАГАТЭ/ВОЗ была отмечена необходимость разработки новой учебной программы для обновления знаний и академического образования медицинских радиационных физиков в таких областях, как анализ данных и процессов, регрессионный анализ, статистическое обучение и глубокое обучение.

Для удовлетворения этих потребностей в 2021 году МАГАТЭ организовало консультативное совещание по подготовке публикации Серии учебных курсов МАГАТЭ в дополнение к публикации Серии учебных курсов МАГАТЭ, № 56 (Rev. 1), «Postgraduate Medical Physics Academic Programmes» («Последипломные программы академической подготовки по медицинской физике»). В настоящей публикации описываются функции и обязанности медицинских физиков клинической квалификации в контексте применения ИИ в радиационной медицине. Кроме того, сформулированы рекомендации в отношении деятельности по непрерывному повышению квалификации.

Настоящая публикация получила одобрение Американской ассоциации физиков в медицине. Сотрудниками МАГАТЭ, ответственными за настоящую публикацию, являлись М. Каррара и Е. Титович из Отдела здоровья человека.

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Настоящая публикация подготовлена на основе оригинального материала, представленного соавторами, и не редактировалась редакционным персоналом МАГАТЭ. Ответственность за выраженные в ней мнения несут соавторы, и эти мнения необязательно отражают точку зрения МАГАТЭ или правительств его государств-членов.

Данные здесь руководящие указания и рекомендации в отношении выявленных примеров положительной практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государствами-членами.

Ни МАГАТЭ, ни его государства-члены не несут ответственности за последствия, которые могут возникнуть в результате использования настоящей публикации. В настоящей публикации не затрагиваются вопросы ответственности — юридической или иного рода — за действия или бездействие со стороны какого-либо лица.

Использование тех или иных названий стран или территорий не означает какого-либо суждения со стороны издателя — МАГАТЭ — относительно правового статуса таких стран или территорий, их органов и учреждений либо относительно определения их границ.

Упоминание названий конкретных компаний или продуктов (независимо от того, указаны ли они как зарегистрированные) не означает какого-либо намерения нарушить права собственности и не должно рассматриваться как одобрение или рекомендация со стороны МАГАТЭ.

Авторы несут ответственность за получение необходимого разрешения, с тем чтобы МАГАТЭ могло воспроизводить, переводить или использовать материал из источников, уже защищенных авторскими правами.

МАГАТЭ не несет ответственности за постоянство и точность приводимых в настоящей публикации адресов сайтов внешних или третьих сторон и не гарантирует того, что информационное наполнение таких сайтов является или останется точным и релевантным.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	1
1.1.	ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	1
1.2.	ЦЕЛЬ	3
1.3.	ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	3
1.4.	СТРУКТУРА	3
2.	ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИНОВ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ	5
2.1.	ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ (ИИ)	5
2.2.	МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ (МО)	5
2.2.1.	Глубокое обучение (ГО).....	6
2.2.2.	Обучение с учителем и без учителя.....	6
2.2.3.	Обучение с подкреплением.....	7
2.3.	БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ	7
3.	ПРОЦЕССЫ В РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЕ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ РИСКИ	9
3.1.	РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫЕ ПРИМЕРЫ ПРОЦЕССОВ В РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЕ НА ОСНОВЕ ИИ	9
3.2.	РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С КЛИНИЧЕСКИМ ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ИИ	12
3.3.	РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОСНОВЕ ИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТНОСТИ О НИХ	14
4.	ФУНКЦИИ И ОБЯЗАННОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ФИЗИКОВ КЛИНИЧЕСКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ В СВЯЗИ С КЛИНИЧЕСКИМ ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИИ.....	18
4.1.	РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	19
4.2.	ПРИЕМКА И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ.....	20
4.3.	ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ И ЛЕЧЕБНЫХ ПРОЦЕДУР.....	21
4.4.	МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ И АСПЕКТОВ БЕЗОПАСНОСТИ	22
4.5.	ОБУЧЕНИЕ И ПОДГОТОВКА ДРУГИХ МЕДИЦИНСКИХ РАБОТНИКОВ	23
4.6.	НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ.....	23
5.	ПРИОБРЕТЕНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ В ОБЛАСТИ ИИ	25
5.1.	ПОСЛЕДИПЛОМНЫЕ ПРОГРАММЫ АКАДЕМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПО МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКЕ.....	25
5.1.1.	Обзор прогрессивных статистических методов	25
5.1.2.	Практические занятия	28
5.1.3.	Источники знаний.....	30

5.2.	СОХРАНЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ФИЗИКОВ КЛИНИЧЕСКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ.....	31
5.2.1.	Инструменты на основе ИИ в области МФ.....	32
5.2.2.	Теоретические принципы ИИ глазами пользователя.....	33
5.2.3.	Общий обзор клинического применения систем ИИ.....	33
5.2.4.	Наилучшая практика применения инструментов на основе ИИ для решения конкретной клинической задачи	33
5.2.5.	Теоретические принципы ИИ глазами разработчика.....	34
6.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	35
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	37
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	41
	СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ	43

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Искусственный интеллект (ИИ) — это термин, охватывающий широкий спектр технологий, призванных наделять машины или компьютеры способностью выполнять свойственные человеку когнитивные функции, такие как обучение, решение проблем и принятие решений [1].

Термин «искусственный интеллект» был впервые предложен для наименования научной области на академическом мероприятии в Дартмутском колледже в 1956 году [2]. После первого всплеска интереса к ИИ в 1950-х и 1960-х годах были отмечены периоды спада, названные «зимами ИИ», за которыми последовали новые всплески интереса. Использование ИИ в здравоохранении началось в 1980-х и 1990-х годах, когда получили более широкое распространение персональные компьютеры, что совпало с разработкой новых популярных алгоритмов машинного обучения (МО), таких как байесовские сети и машины опорных векторов [3]. Специальные модели глубокого обучения (ГО), называемые сверточными нейронными сетями (СНС), были впервые использованы в медицинской визуализации в начале 1990-х годов [4].

В то же время оцифровка медицинских данных открыла возможности для анализа историй болезни при помощи компьютерных алгоритмов. Появление графических процессоров (ГП) и облачных компьютеров упростило доступ к большим вычислительным мощностям, необходимым для применения средств МО к большим наборам данных. В 2010-х годах замечательные достижения в развитии методов ГО и концепция радиомики, в рамках которой признаки, описывающие фенотипы опухолей при визуализации, анализировались для характеристики поражений или прогнозирования исхода заболевания при помощи МО, способствовали широкому распространению исследований по вопросам использования ИИ для визуализации [5, 6]. После того как в 2012 году AlexNet добилась успеха в ежегодном крупномасштабном соревновании ImageNet по классификации изображений, использование СНС в решении задач распознавания изображений существенно возросло [7].

В последние несколько лет наблюдается небывалый интерес к использованию ИИ в здравоохранении [8], и широко распространено мнение, что ИИ коренным образом изменит применяемые в здравоохранении процессы [9]. В настоящее время изучается множество применений в различных областях здравоохранения, и ожидается, что в ближайшем будущем этот интерес будет только расти. Совокупность данных, используемых для разработки основанных на ИИ моделей, известная как *экосистема данных о здоровье*, также стремительно увеличивается в объеме [10]. Экосистема данных о здоровье включает в себя персональные данные из «стандартных» источников, например данные, связанные с анамнезом и медицинской картой, геномикой и/или визуализацией, а также информацию из «расширенных» источников, например персональные данные, связанные с окружающей средой, поведением, образом жизни и/или социально-экономическим положением [11]. На всех этапах внедрения ИИ сохраняются разного рода проблемы [12], однако в ближайшие 5–10 лет можно ожидать роста клинического применения систем на основе ИИ.

Задачей многих клинических применений ИИ будет облегчение и улучшение медицинской практики [9]. По всей видимости, работники здравоохранения будут получать *поддержку* от ИИ в виде различных процессов, относящихся к разным

«уровням интеллекта». Что касается медицинского использования излучений, то принято считать, что специалисты не будут *заменены* ИИ. «Заменит ли ИИ радиологов?» — это неверно поставленный вопрос, но принято считать, что радиологи, использующие ИИ, в будущем смогут заменить (или работать лучше) радиологов, которые его не используют [13, 14]. Инструменты ИИ могут облегчить труд специалистов за счет автоматизации повторяющихся этапов целых рабочих процессов (например, сегментации изображений, планирования лечения, гарантии качества). В этих случаях ИИ будет поддерживать рабочие процессы, но обязательно при условии проверки/контроля со стороны ответственного специалиста. Инструменты ИИ также могут использоваться для поддержки специалистов, ответственных за выполнение действий или принятие решений в условиях клиники. В этом контексте ИИ может не только дополнить клиническую практику, но и расширить ее, обеспечив эффективность и проявив способность к глубокому анализу, выходящую за рамки человеческих возможностей [12]. Например, инструменты на основе ИИ могут помочь в оптимизации процедур визуализации, облегчив реконструкцию изображений.

Несмотря на то что ИИ является очень популярной темой клинических исследований и дискуссий, в целом наблюдается недостаток готовых инструментов на основе ИИ, которые использовались бы в клинике. На самом деле внедрение ИИ в сферу здравоохранения сопряжено со многими проблемами и потенциальными рисками непредвиденных последствий клинического, технического, этического и нормативного плана, а также последствий для безопасности и неприкосновенности частной жизни [11, 15–18]. Если эти проблемы не будут решены, они могут стать помехой для более широкого клинического применения ИИ [19]. Реальные риски непредвиденных и негативных последствий, отсутствие разнообразия, стандартизации и гармонизации элементов данных, используемых для разработки и обучения моделей на основе ИИ, проблемы их клинического применения, валидации и гарантии качества, юридические и этические вопросы, а также отсутствие специального образования и подготовки у участвующих в этом процессе медицинских работников — все это может стать причиной нежелания внедрять системы на основе ИИ в более широком масштабе. По сравнению со статистикой и другими более традиционными подходами к анализу данных, еще одна проблема, связанная с внедрением ИИ, заключается в том, что многие инструменты на основе ИИ могут восприниматься как «черные ящики»: может быть трудно понять, почему или как алгоритм принимает свои решения, из-за сложности алгоритма, который часто использует большое количество входных данных и внутренних переменных. Кроме того, мощные инструменты на основе ИИ нуждаются в больших объемах данных для точного моделирования, а общепризнанного метода определения размера выборки, необходимой для обучения и валидации, как правило, не существует. Это подразумевает сбор и анализ как можно большего количества данных, а не просто случайной или статистически значимой выборки.

Прежде чем приступить к клиническому применению любого инструмента на основе ИИ, необходимо убедиться в его безопасности, действенности, уместности и эффективности. Чтобы выходные данные, полученные при помощи инструментов на основе ИИ, могли быть интерпретированы лицами, принимающими решения в клинике, они не должны содержать систематических ошибок и зависеть от поставщика инструмента, а также должны соответствовать этическим и юридическим принципам и стандартам ценности [20]. Поэтому необходимо сформировать ответственную группу медицинских работников, которая будет руководить процессом выбора и безопасного внедрения систем ИИ в клиническую практику. Как ученый-физик, работающий в

условиях клиники, медицинский физик клинической квалификации (МФКК) считается ключевым специалистом, который должен быть вовлечен в этот процесс [21].

1.2. ЦЕЛЬ

Функции и обязанности МФКК, установленные в публикации № 25 Серии изданий МАГАТЭ по здоровью человека [22], могут быть интерпретированы в контексте применения ИИ в радиационной медицине. Учитывая их «способность синтезировать знания из ряда различных дисциплин» [21], МФКК должны получить соответствующие технические знания, чтобы уметь подходить к проблематике ИИ со знанием и пониманием дела. Таким образом, на повестке дня остро стоит необходимость сокращения разрыва в образовании и подготовке нынешних и будущих МФКК, которые, по всей вероятности, будут заниматься клиническим внедрением ИИ. Для новых поколений МФКК требуется дополнение к существующим программам академической и клинической подготовки [23–27], поскольку в стандартной образовательной программе медицинского физика, как правило, недостаточно элементов, посвященных основам ИИ. Кроме того, опытные МФКК нуждаются в программах непрерывного повышения квалификации (НПК), которые повышают уровень профессиональной компетентности в области ИИ.

1.3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящей публикации обрисованы функции и обязанности МФКК в деле внедрения и применения средств ИИ при медицинском использовании излучений. В ней даны определения ИИ и некоторых других терминов, часто используемых в контексте ИИ (например, машинного обучения (МО), глубокого обучения (ГО), больших данных). Также разбираются принципы работы инструментов на основе ИИ, их примеры и сопутствующие риски.

Настоящая публикация дополняет руководящие материалы МАГАТЭ по последипломным программам академической подготовки по медицинской физике. В дополнение к основным модулям в публикацию Серии учебных курсов МАГАТЭ, № 56 (Rev. 1) [28] включен факультативный предмет «Прогрессивные статистические методы». Приводится краткое изложение содержания этого предмета. Кроме того, рассматриваются принципы и потребности непрерывного образования МФКК в области ИИ и предлагается содержание курсов НПК.

1.4. СТРУКТУРА

Поскольку в литературе можно встретить множество неполных, неточных или даже противоречивых определений ИИ, в разделе 2 приведено определение ИИ для целей настоящей публикации, а также других родственных технических терминов.

В разделе 3 приведен репрезентативный перечень примеров клинических процессов, в которых уже используется или в ближайшем будущем будет использоваться ИИ. Чтобы повысить осведомленность о рисках потенциального внедрения инструментов на основе ИИ в клинике, рассматриваются также некоторые потенциальные опасности и проблемы. Кроме того, приводится краткая информация о некоторых существующих рекомендациях, руководящих указаниях и контрольных перечнях для обеспечения последовательности и воспроизводимости результатов научных изысканий и клинических исследований в области ИИ.

МФКК — это ключевые работники здравоохранения, мнение которых необходимо учитывать при выборе, безопасном внедрении и использовании ИИ в клинике. Их функции и обязанности, описанные в документе № 25 Серии изданий МАГАТЭ по здоровью человека [22], рассматриваются в разделе 4 в контексте применения ИИ в радиационной медицине.

В разделе 5 содержатся руководящие указания в отношении компетенций, которые должны иметь нынешние и будущие МФКК. Представлен подробный план факультативного модуля последипломных программ академической подготовки по медицинской физике, который может преподаваться в странах, обладающих соответствующим экспертным потенциалом и ресурсами. Кроме того, рассматриваются учебно-образовательные мероприятия в рамках НПК, посвященные применению ИИ в медицинской физике.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИНОВ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ

Специалисты должны одинаково понимать основные технические термины, связанные с ИИ. В этом разделе даны определения ИИ, МО, ГО, обучения с учителем, обучения без учителя, обучения с подкреплением и больших данных. На рис. 1 показана взаимосвязь между ИИ, МО и ГО.



РИС. 1. Взаимосвязь между искусственным интеллектом, машинным обучением и глубоким обучением.

2.1. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ (ИИ)

Искусственный интеллект — это совокупность технологий, позволяющих машинному или компьютерному агенту выполнять задачи, для которых обычно используется человеческий интеллект, например чувствовать, понимать, учиться, принимать решения и действовать. В широком смысле ИИ включает в себя компьютерную медицинскую диагностику (КМД), радиомику, МО (включая ГО), компьютерное зрение, экспертные системы и обработку языковой информации. В последнее десятилетие новые достижения в области ГО значительно ускорили темпы внедрения ИИ и позволили использовать большие наборы данных и существующий опыт для повышения эффективности рабочих процессов или автоматизации таких задач, как прогнозирование, обнаружение, классификация, семантическая транскрипция, реконструкция и обработка изображений или сенсомоторное управление [1].

2.2. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ (МО)

МО — это подобласть ИИ, которая предполагает использование компьютерных алгоритмов для формирования логических выводов и поиска закономерностей в данных. Алгоритмы имитируют то, как человек учится, извлекая существенные признаки из данных, а затем принимает решения на основе логических выводов. Например, чисто физический анализ, позволяющий идентифицировать различные ткани на изображении, не будет считаться системой МО, поскольку в нем отсутствует элемент обучения и процесс основан исключительно на ранее установленных правилах (например, простой технике сегментирования по порогу на основе интенсивности вокселей). Если какой-либо компьютерный алгоритм или другой подход используется для того, чтобы обучиться отображению изображений на ткань на основе помеченных примеров пар

(фрагмент изображения, характеристики ткани), это будет примером системы МО. На высоком уровне системы МО состоят из четырех основных элементов:

- a) заданной цели или функции потерь, которая является критерием эффективности системы (например, как выбрать признак и насколько хорошо прогнозируемые метки тканей соответствуют фактическим меткам);
- b) класса модели, описывающего набор функций, которые могут быть использованы для отображения входных данных на выходных данных;
- c) алгоритма, используемого для поиска модели внутри класса моделей, которая имеет наилучшие характеристики с учетом поставленной цели;
- d) независимых данных, используемых для расчета прогнозов и потерь (включая наборы данных для валидации).

В МО существуют три основные подобласти: обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с подкреплением. Другой особой областью МО является ГО.

2.2.1. Глубокое обучение (ГО)

В процессе ГО используются нейронные сети как набор функций для перехода от входных данных к выходным. В ГО существует множество архитектур, или классов функций, предназначенных для различных типов данных: кодировщики для обучения представлениям, вариативные кодировщики (VAE) и генеративно-состязательные сети (GAN) для генеративного обучения, сверточные сети и сети визуальных трансформеров (ViT) для обработки изображений, сети трансформеров для текста и т.д. Современные модели ГО часто имеют миллионы параметров. В решении многих задач, таких как сегментация и классификация изображений [29, 30], обработка биомедицинских данных [31] и реконструкция изображений [32], модели ГО достигли выдающихся результатов. Для обучения надежных нейронных сетей, хорошо обобщаемых на новые данные, им, как правило, требуются большие наборы данных («data hungry»). Если наборы данных недостаточно велики или процессы обучения и валидации не были проведены должным образом, может возникнуть проблема переобучения (см. раздел 3.2).

2.2.2. Обучение с учителем и без учителя

Обучение с учителем — это подобласть МО, в которой данные предоставляются в виде примеров пар (вход, выход), а целью является обучение функции предсказания выходных данных при заданных входных, например фрагментов изображения как входных данных и типов тканей как выходных в контексте сегментации. Например, для обнаружения заболевания легких можно использовать рентгеновские снимки или компьютерные томограммы (КТ) грудной клетки в качестве входных данных и помеченные классы заболеваний в качестве выходных.

Обучение без учителя — это другая подобласть МО, в которой данные предоставляются без какой-либо метки истинности, в виде простых примеров (входных данных), а целью является изучение некоторой низкоразмерной структуры (для характеристики закономерностей) в данных [31]. Например, могут иметься фрагменты изображений и может быть поставлена задача провести их кластеризацию, чтобы лучше понять, какие типы фрагментов существуют в данных. Иногда обучение без учителя может также

использоваться для определения способов классификации и отображения данных, которые затем могут быть использованы для последующего прогнозирования. Например, кластеризация может оказаться хорошим способом формирования прогнозов относительно типов тканей.

Обучение с частичным привлечением учителя — это гибрид двух вышеупомянутых методов, при котором используется небольшое количество помеченных данных и большое количество непомеченных примеров. Это особый случай обучения с частичным контролем со стороны учителя [33]. Обучение с частичным привлечением учителя также может называться трансдуктивным или индуктивным обучением, и оно очень полезно, поскольку снижает потребность в меченых данных.

2.2.3. Обучение с подкреплением

Обучение с подкреплением — это подобласть МО, в которой данные предоставляются в виде истории для некоторой последовательности (вход, действие, вознаграждение, вход, действие, вознаграждение...) [34]. Здесь вход, или состояние, — это наблюдение, которое получает система МО, действие — это решение, которое она принимает, а вознаграждение — это оценка, которую она получает за свою работу. Цель состоит в том, чтобы научиться отображению (известному в компьютерных науках как «политика») входов на действия, которое максимизирует сумму (потенциально взвешенных) вознаграждений.

2.3. БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ

Большие данные — это наборы данных, которые слишком велики или сложны для того, чтобы с ними можно было работать с помощью стандартных инструментов анализа данных. Обычно под ними понимают данные, которые отличаются большим объемом (множество примеров), разнообразием (высокая степень неоднородности) и скоростью (скорость поступления входных данных). Например, исследовательская группа в НИЗ формирует набор данных с более чем 30 000 рентгеновских снимков грудной клетки [35], каждый из которых содержит до 14 различных меток патологии грудной клетки. Другой пример больших данных — данные о геномной последовательности, которые могут включать данные выражения около двадцати тысяч генов и тысяч клеток. Часто подразумевается, что большие данные — это данные из более сложных источников (например, более современные приборы, множество режимов), для проведения надежного анализа которых требуются другие алгоритмы, помимо классических статистических методов.

В руководстве ВОЗ по вопросам этики и управления при применении ИИ в здравоохранении [11] говорится следующее:

«За последние два десятилетия объем данных, которые можно рассматривать как данные о здоровье, значительно возрос. В настоящее время к ним относятся огромное количество персональных данных о человеке из многих источников, в том числе геномные данные, рентгеновские снимки, медицинские карты и данные, не относящиеся к здоровью, преобразованные в медицинские данные. Различные типы данных, известные под общим названием "биомедицинские большие данные", образуют экосистему данных о здоровье, включающую данные из стандартных источников (например, данные медицинских служб, учреждений здравоохранения, научных исследований) и дополнительных источников

(экологические данные, сведения об образе жизни, социально-экономические, поведенческие и социальные данные). Таким образом, источников медицинских данных, учреждений, желающих использовать эти данные, а также форм коммерческого и некоммерческого применения становится все больше».

Даже если такие данные существуют, они обычно разрознены и хранятся в отдельных базах данных. Создание методологий сведения этих данных в онтологические модели [36] и объединенные системы данных — это важная работа, которая находится пока на ранней стадии и которая необходима для широкомасштабной оптимизации здравоохранения на основе ИИ. Помимо *количества* данных, важную роль в успешном создании эффективных систем ИИ играет также *качество* данных. В этой связи основополагающую роль играет процесс курирования данных, позволяющий разрабатывать модели ИИ на основе релевантных, согласованных и качественных данных, не содержащих ошибок.

3. ПРОЦЕССЫ В РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЕ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ РИСКИ

3.1. РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫЕ ПРИМЕРЫ ПРОЦЕССОВ В РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЕ НА ОСНОВЕ ИИ

Были изучены многочисленные формы применения ИИ в разных областях здравоохранения. С 2015 года количество публикаций, посвященных искусственному интеллекту и/или ГО в медицине, растет в геометрической прогрессии [37, 38]. Поставщики начали разработку и реализацию некоторых основанных на ИИ инструментов для конкретных форм применения в области визуализации и лучевой терапии.

Несмотря на рост популярности и доступности ИИ, о широком внедрении существующих инструментов на основе ИИ в клиническую практику говорить не приходится. Однако, поскольку эта область быстро развивается, в ближайшем будущем можно ожидать более широкого распространения и внедрения инструментов на основе ИИ для поддержки многих процессов. Согласно прогнозам, основанным на кривой зрелости технологий, в ближайшие несколько лет около 20% клинических практик могут перейти на модели ГО [39]. Списки клинических процессов и связанных с ними применений, которые основаны на ИИ или могут быть вскоре переведены на его использование (или включать в себя компоненты ИИ), приведены в таблице 1 и таблице 2.

В таблице 1 приведены примеры процессов и связанных с ними применений в области медицинской визуализации, а в таблице 2 — примеры и связанные с ними применения в области радиационной онкологии. Адаптивная лучевая терапия и радиомика среди приведенных здесь применений не упоминаются, поскольку они рассматриваются как комбинации нескольких применений на основе ИИ, которые указаны в таблицах по отдельности.

Эти таблицы не претендуют на полноту, а скорее демонстрируют типичные примеры процессов. Многим из перечисленных применений «еще предстоит пройти долгий путь, прежде чем будут разработаны точные, надежные и клинически значимые инструменты ГО, благодаря которым потенциал ГО в конечном счете проделает путь от стола разработчика до больничной палаты и пойдет на пользу лечению пациентов» [37].

ТАБЛИЦА 1. ПРИМЕРЫ ПРОЦЕССОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ОСНОВАНЫ НА ПРИМЕНЕНИИ ИИ. ЧАСТЬ 1. МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Процесс	Формы применения
Оптимизация рабочего процесса при визуализации	Определение приоритетности пациентов; выбор метода визуализации и индивидуальных протоколов.
Оценка дозы облучения пациента при радиологической визуализации	Контроль соответствующих параметров дозы; оптимизация процедур визуализации путем сравнения подведенных доз с эталонными.
Получение и реконструкция изображений	Выбор параметров получения КТ-изображения; оптимальная методика реконструкции изображений для МРВ в реальном времени; реконструкция изображений с учетом особенностей пациента для улучшения качества изображения при меньшей дозе облучения; уменьшение артефактов; полностью автоматическая экстракция респираторных сигналов на основе данных; генерирование синтетических изображений; виртуальная визуализация с повышением контраста; итеративная реконструкция изображений.
Регистрация и слияние изображений	Мономодальная и мультимодальная регистрация изображений; деформируемая регистрация; регистрация 2D-3D изображений.
Выявление и характеристика заболеваний	КМД (обнаружение/диагностика) рака молочной железы, рака легких, рака предстательной железы, ишемической болезни сердца, COVID-19 и других легочных заболеваний.
Оценка риска	Оценка риска развития рака молочной железы, оценка плотности молочной железы, модели риска на основе визуализации.
Мониторинг заболеваний и оценка лечебных мероприятий	Мониторинг хронических заболеваний, прогнозирование реакции на терапию, оценка риска рецидивов.

Примечание. КТ — компьютерная томография; МРВ — магнитно-резонансная визуализация; 2D — двухмерный; 3D — трехмерный; КМД — компьютерная медицинская диагностика.

ТАБЛИЦА 2. ПРИМЕРЫ ПРОЦЕССОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ОСНОВАНЫ НА ПРИМЕНЕНИИ ИИ. ЧАСТЬ 2. РАДИАЦИОННАЯ ОНКОЛОГИЯ

Процесс	Формы применения
Обоснование решений о лечении	Выбор индивидуального подхода к лечению (например, протонной или фотонной терапии); стратификация риска пациента перед лечением; прогнозирование реакции опухоли и токсичности ЛТ перед лечением; индивидуальное назначение дозы ЛТ.
Локализация и сегментация мишени	Автоматическое обнаружение опухоли (например, в головном мозге, легких, шейке матки); автоматическая сегментация КОМ с учетом микроскопического распространения опухоли у конкретного пациента; автоматическое выделение полости резекции (например, в головном мозге, молочной железе).
Сегментация объема КО	Автоматическая сегментация объема КО для многих участков (например, головы и шеи, груди, таза).
Прогнозирование дозы и автоматическое планирование	Инструменты для обоснования принимаемых решений при планировании ЛТМИ/РТМО; прогнозирование оптимальной дозы с учетом анатомических особенностей; автоматизация процесса планирования для повышения эффективности и качества плана; многокритериальная оптимизация плана лечения.
ЛТВК и управление движением	2D- или 3D-локализация мишени на основе изображений перед лечением; автоматическое распознавание и выравнивание реперных меток или анатомических структур; отслеживание опухоли в реальном времени; мониторинг движения пациента на основе реперных меток в реальном времени; отслеживание без маркеров; управление движением при ЛТМРВ; прогнозирование движения пациента.
ГК плана лечения	Гарантия качества с учетом особенностей пациента (например, прогнозирование скорости прохождения при ЛТМИ/РТМО, ГК с учетом особенностей пациента перед лечением).

ТАБЛИЦА 2. ПРИМЕРЫ ПРОЦЕССОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ОСНОВАНЫ НА ПРИМЕНЕНИИ ИИ. ЧАСТЬ 2. РАДИАЦИОННАЯ ОНКОЛОГИЯ (продолжение)

Процесс	Формы применения
ГК оборудования	ГК конкретного аппарата; мониторинг рабочих характеристик с течением времени; прогнозирование неисправностей для планирования технического обслуживания и ГК, дополнительные процедуры тестирования и технического обслуживания.

Примечание. ЛТ — лучевая терапия; КОМ — клинический объем мишени; КО — критический орган; ЛТМИ — лучевая терапия с модуляцией интенсивности; РТМО — ротационная терапия с модуляцией объема излучения; ЛТВК — лучевая терапия с визуальным контролем; ЛТМРВ — лучевая терапия с магнитно-резонансной визуализацией; ГК — гарантия качества.

3.2. РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С КЛИНИЧЕСКИМ ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ИИ

ИИ иногда преподносится промышленностью и исследователями как *панацея*, которая решит или в значительной степени смягчит большинство клинических проблем или сделает сложные технологии более доступными. В ближайшем будущем многие процессы, связанные с медицинским использованием излучений, вероятно, будут основываться на ИИ (см. раздел 3.1), но широкий клинический опыт применения ИИ и доказательства его полезности в настоящее время отсутствуют. Ненадлежащее клиническое использование инструментов на основе ИИ или неправильно настроенных моделей на основе ИИ может серьезно подорвать возможные клинические преимущества и, безусловно, увеличить риски для безопасности и здоровья пациентов.

Наряду с преимуществами для здравоохранения применение ИИ в медицине несет в себе новые проблемы и риски. Крайне важно, чтобы работники здравоохранения прошли надлежащее обучение и подготовку и были осведомлены об этих рисках. Если риски не будут должным образом учтены, качество медицинских услуг и безопасность пациентов могут оказаться под угрозой. Проблемы безопасности в условиях клиники могут быть вызваны неправильным или ненадлежащим использованием инструментов на основе ИИ и/или использованием моделей на основе ИИ, которые были неправильно или неадекватно обучены. Это может иметь последствия разного временного масштаба (краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные) [40]. Следует также принимать во внимание юридическую и этическую сторону дела. Ниже перечисляются некоторые проблемы, связанные с использованием инструментов на основе ИИ.

Результат работы моделей на основе ИИ сильно зависит от качества и количества данных, которые были собраны, аннотированы и использованы для их обучения. *Непоследовательные, несбалансированные по классам или содержащие систематические ошибки данные* могут негативно повлиять на результат применения ИИ и привести к созданию неудовлетворительно работающих моделей ИИ. Недавний системный обзор 62 исследований, в которых использовались средства МО для выявления COVID-19 на рентгенограммах и компьютерных томограммах грудной клетки, показал, что ни одна из выявленных моделей непригодна для потенциального клинического применения из-за несовершенства методологии и/или систематических

ошибок [41]. Если говорить в целом, то набор данных с систематическими ошибками может недооценивать контингент больных, например с точки зрения возраста, пола, этнической принадлежности, социально-экономического положения или географического происхождения, или подразумевать другой подход к визуализации или лечению, например другой тип технологий для визуализации и лучевой терапии, и это может тем или иным образом повлиять на работу модели ИИ. Обычно это приводит к ошибочной реакции ИИ, например к более низкой точности и повышенному риску вредных последствий для недооцененных групп [42]. Ненадлежащее использование ИИ может вести к сохранению и даже закреплению существующего социального неравенства [43] и к усилению существующих диспропорций в системе здравоохранения [44]. Было продемонстрировано, что некоторые классификаторы, основанные на ИИ, при диагностике постоянно обходят стороной недостаточно охваченные группы пациентов [44]. Было продемонстрировано, что гендерный дисбаланс в наборах данных медицинской визуализации ведет к созданию классификаторов с систематическими ошибками, например для приложений КМД [45]. Может сложиться мнение, что ненадлежащее использование ИИ негативно влияет на права человека [46].

При недостаточной гармонизации наборы данных медицинской визуализации разных участков тела могут дать систематические ошибки, затрудняющие интерпретацию [47], которые, в свою очередь, могут повлиять на результаты работы алгоритмов МО [48]. Недавно было продемонстрировано, что некоторые методики ИИ, разработанные для автоматической диагностики COVID-19 по рентгенограммам грудной клетки, лучше распознают лечебное учреждение и страну происхождения рентгенограммы, чем характеристики заболевания. Это объясняется тем, что в некоторых наборах данных присутствовали затрудняющие интерпретацию факторы, такие как рентгеноконтрастные маркеры, размер пикселей и общие значения пикселей, которые могли случайным образом коррелировать с наличием заболевания [49]. Такой тип ошибок, когда ИИ повышает собственную эффективность, используя более быструю, но неверную стратегию обучения, называется *ускоренным обучением*.

Если данные, использованные для разработки модели ИИ, имеют иное распределение, чем данные, вводимые в модель ИИ при клиническом применении, происходит *смещение набора данных*. Такое смещение может происходить, когда устоявшаяся клиническая практика эволюционирует с течением времени в результате внедрения новых методик лечения и технологий или когда происходит постепенное изменение характеристик контингента больных. Оно также происходит, если для обучения был использован набор данных с систематическими ошибками или если основанный на ИИ инструмент применяется к контингенту, отличному от того, на котором он обучался. Смещение наборов данных может со временем привести к снижению надежности системы ИИ, поскольку обычные модели МО обычно плохо адаптируются к существенным изменениям в рабочих данных или к непредвиденным особенностям контингента больных [40]. Как указывают Subbaswamy и Saria [50], «помимо снижения рабочих характеристик, пренебрежение смещением может также стать причиной принятия опасных решений на практике: система может не диагностировать серьезно больных пациентов или может рекомендовать вредные способы лечения». Общая информация о категориях и соответствующих примерах смещения наборов данных, а также о стратегиях распознавания и уменьшения этого явления приведена в [51].

Модели ИИ также имеют тенденцию к *переобучению*. Переобучение представляет собой явление, когда модели очень хорошо работают на обучающих данных — до такой

степени, что они более восприимчивы к шуму в данных, чем к их основным закономерностям. Это происходит в том случае, если количество признаков, приходящихся на один субъект, не намного меньше количества субъектов в наборе данных. Результатом этого является плохая *обобщаемость* модели, что означает, что она будет плохо работать на новых, неизвестных наборах данных [52]. Недавнее исследование продемонстрировало неодинаковую обобщаемость модели ГО для выявления пневмонии на рентгенограммах грудной клетки. Тестовые данные, полученные в том же лечебном учреждении, что и обучающие, переоценили эффективность работы одной и той же модели при вводе в нее реальных данных [53]. Способы предотвращения переобучения многообразны: к ним относятся предварительная регистрация протокола анализа, выбор меньших наборов признаков, контроль сложности модели и использование строгих процедур внутренней и внешней валидации.

На результаты обучения системы МО могут влиять и другие источники неопределенности, например ошибки при поиске оптимальных решений из-за наличия локальных минимумов в многомерной функции, которую необходимо минимизировать.

Как указывают Challen и др. [40], к дополнительным краткосрочным проблемам применения систем ИИ можно отнести их потенциальную *нечувствительность к реальным последствиям неверного результата* при использовании в клинике, их характер *черного ящика* и отсутствие уверенности в точности результата (отсутствие известной степени доверия к результату). Другие проблемы безопасности могут неожиданно возникнуть вследствие такой неправильной установки в сознании врача-клинициста, как *чрезмерное доверие к автоматике*, — явления, когда клиницист возлагает на систему ИИ больше надежд, чем она того заслуживает [54]. Системы обоснования клинических решений на базе ИИ могут, к примеру, внушить неоправданное чувство уверенности начинающим врачам и дать им ложное ощущение безопасности [55]. Вместо того чтобы проводить критическую и обстоятельную оценку, неопытные наблюдатели могут поддаться влиянию этих систем и заняться поиском подтверждающей информации и ничего иного [56].

3.3. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОСНОВЕ ИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТНОСТИ О НИХ

Клинические и научные исследования, связанные с ИИ, также подвержены рискам, упомянутым в разделе 3.2. Среди большого и быстро растущего числа недавних публикаций есть некоторые, отличающиеся методическими недоработками, низкой прозрачностью и плохой воспроизводимостью результатов [57]. В некоторых случаях предметом озабоченности была также неполная или непоследовательная отчетность, а также недостаточная строгость подхода.

Для решения этих проблем ряд организаций и рецензируемых международных журналов недавно разработали или разрабатывают в настоящее время рекомендации, руководства или контрольные перечни для повышения качества исследований на основе ИИ, а также для обеспечения строгости и воспроизводимости результатов научных изысканий, публикаций и клинических исследований [58]. Некоторые из этих публикаций перечислены в таблице 3. Эти публикации помогают разработчикам алгоритмов, исследователям, заведующим хранилищами, авторам и рецензентам рукописей, редакторам журналов и пользователям моделей достичь наивысших результатов в своей

области компетенции [59]. Такие документы могут быть полезны и для МФКК, поскольку они могут охватывать многие из их функций в контексте клинических исследований и изысканий в области радиационной медицины (см. раздел 4). В настоящее время разрабатываются и другие методические материалы, например версия контрольного перечня STARD для систем ИИ (протокол STARD-AI [60]), а также расширенный вариант контрольного перечня TRIPOD для систем ИИ и инструмент PROBAST, предназначенный для изучения предсказательных моделей для диагностики и прогнозирования на основе ИИ (TRIPOD-AI и PROBAST-AI [61]).

Что касается публикаций по тематике ИИ в журнале «Медицинская физика», то недавно были изданы специальные рекомендации, включая контрольный перечень, по применению ИИ в медицинской физике (CLAMP) в целях обеспечения строгости и воспроизводимости результатов научных изысканий [62].

Кроме того, многочисленные общества ведут совместную работу по созданию больших, открытых наборов данных об изображениях, чтобы предоставить в распоряжение специалистов, занимающихся изучением ИИ, репрезентативные и разнообразные данные об изображениях, которые помогут уменьшить систематические ошибки в наборах данных и алгоритмах ИИ.

ТАБЛИЦА 3. ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ, РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ИЛИ КОНТРОЛЬНЫЕ ПЕРЕЧНИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОСНОВЕ ИИ

Название публикации	Описание	Год издания
Assessing Radiology Research on Artificial Intelligence: A Brief Guide for Authors, Reviewers, and Readers—From the Radiology Editorial Board (Оценка радиологических исследований в области искусственного интеллекта: краткое руководство для авторов, рецензентов и читателей — от редколлегии журнала «Радиология») [63]	Приведены и рассмотрены девять ключевых моментов, связанных с оценкой исследований в области ИИ	2020
Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): A Guide for Authors and Reviewers (Контрольный перечень по применению искусственного интеллекта в медицинской визуализации (CLAIM): руководство для авторов и рецензентов) [64]	Приведен контрольный перечень из 42 пунктов, и все пункты рассмотрены по отдельности	2020

ТАБЛИЦА 3. ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ, РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ИЛИ КОНТРОЛЬНЫЕ ПЕРЕЧНИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОСНОВЕ ИИ (продолжение)

Название публикации	Описание	Год издания
<p>Minimum information about clinical artificial intelligence modelling: the MI-CLAIM checklist (Минимальная информация о моделировании клинического применения искусственного интеллекта: контрольный перечень MI-CLAIM) [59]</p>	<p>Описаны шесть частей модели MI-CLAIM и приведен контрольный перечень</p>	2020
<p>Guidelines for clinical trial protocols for interventions involving artificial intelligence: the SPIRIT-AI extension (Руководство по протоколам клинических испытаний для вмешательств с применением искусственного интеллекта: расширенный вариант SPIRIT-ИИ) [65]</p>	<p>Приведен расширенный вариант контрольного перечня SPIRIT, 15 пунктов которого необходимо учитывать при составлении протоколов клинических испытаний для вмешательств с применением ИИ</p>	2020
<p>Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI Extension (Руководство по составлению протоколов клинических испытаний для вмешательств с применением искусственного интеллекта: расширенный вариант CONSORT-AI) [66]</p>	<p>Приведен расширенный вариант контрольного перечня CONSORT с 14 новыми пунктами, которые необходимо дополнительно учитывать в случае составления протоколов клинических испытаний для вмешательств с применением ИИ</p>	2020
<p>The TRUE Checklist for Identifying Impactful Artificial Intelligence-Based Findings in Nuclear Medicine: Is It True? Is It Reproducible? Is It Useful? Is It Explainable? (Контрольный перечень TRUE для выявления значимых результатов, полученных на основе искусственного интеллекта, в ядерной медицине. Верны ли они? Воспроизводимы ли они? Полезны ли они? Объяснимы ли они?) [67]</p>	<p>Приведен простой контрольный перечень из 4 базовых вопросов для оценки вероятности того, что та или иная рукопись, посвященная тематике ИИ, будет значимой для этой области исследований</p>	2021

ТАБЛИЦА 3. ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ, РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ИЛИ КОНТРОЛЬНЫЕ ПЕРЕЧНИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОСНОВЕ ИИ (продолжение)

Название публикации	Описание	Год издания
AI in Medical Physics Guidelines for publication (ИИ в медицинской физике: руководство по изданию рукописей) [62]	Контрольный перечень CLAMP, отражающий требования к рукописям по вопросам применения ИИ, которые посылаются в журнал «Медицинская физика»	2021
Nuclear Medicine and Artificial Intelligence: Best Practices for Evaluation (the RELAINCE Guidelines) (Ядерная медицина и искусственный интеллект: наилучшая практика оценки (Руководство RELAINCE)) [68]	Основные принципы объективной оценки моделей ИИ в ядерной медицине	2022
Guidelines and quality criteria for artificial intelligence-based prediction models in healthcare: a scoring review (Руководящие принципы и критерии качества для предсказательных моделей на основе искусственного интеллекта в здравоохранении: предварительный обзор) [69]	Приведены рекомендации по разработке, оценке и внедрению предсказательных моделей на базе ИИ путем применения шестиступенчатого структурированного подхода	2022
Reporting guideline for the early-stage clinical evaluation of decision support systems driven by artificial intelligence: DECIDE-AI (Руководство по составлению отчетов о выполняемой на ранней стадии клинической оценке систем обоснования решений при помощи искусственного интеллекта: DECIDE-AI) [70, 71]	Приведен контрольный перечень, включающий 17 относящихся к ИИ и 10 общих позиций, по которым представляется отчетность. Перечислен ряд существующих и готовящихся к выпуску руководств по отчетности	2022

4. ФУНКЦИИ И ОБЯЗАННОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ФИЗИКОВ КЛИНИЧЕСКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ В СВЯЗИ С КЛИНИЧЕСКИМ ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИИ

Как правило, для эффективного и безопасного внедрения, применения и обслуживания систем ИИ в клиниках требуются знания в области медицины. В клинических условиях МФКК — это тот специалист в коллективе медицинских работников, который может задействовать сложные технологические инструменты, такие как системы ИИ, для удовлетворения потребностей клиники. Как указывается в публикации № 25 Серии изданий МАГАТЭ по здоровью человека [22], одной из основных функций и обязанностей МФКК, общих для всех направлений медицинской физики, является технический надзор за эксплуатацией и обслуживанием оборудования:

«МФКК отвечают за разработку процедур приемки и ввода в эксплуатацию диагностического, терапевтического и измерительного оборудования». Они «осуществляют контроль за их реализацией, выполняя измерения по программе контроля качества и калибровочные измерения, чтобы гарантировать безопасную и оптимальную работу оборудования, и выдают разрешение на клиническое использование оборудования».

С учетом этой общей формулировки важно конкретизировать функции и обязанности МФКК в связи с внедрением, снижением рисков и использованием ИИ в радиационной медицине. В случае ненадлежащего использования продуктов на основе ИИ МФКК в принципе несут ответственность за физические и технические аспекты валидации, приемки, обслуживания, обеспечения безопасности и ГК этих инструментов на месте. Можно выделить шесть основных зон ответственности, имеющих отношение к МФКК и клиническому использованию ИИ во всех направлениях медицинской физики:

- a) разработка технических характеристик оборудования;
- b) приемка и ввод в эксплуатацию оборудования;
- c) оптимизация физических аспектов медицинских процедур;
- d) менеджмент качества физических и технических аспектов и аспектов безопасности;
- e) обучение и подготовка других медицинских работников;
- f) научные исследования и разработки.

Нижеследующие подразделы выстроены в соответствии с этими основными зонами ответственности. Для каждой зоны ответственности приводится поэтапное описание потенциальных процессов на основе ИИ, в которых задействованы МФКК. Коллектив специалистов обычно состоит из врачей-клиницистов, МФКК и медицинских радиационных технологов в области лучевой терапии, радиологии или ядерной медицины (но может включать в себя и других специалистов).

4.1. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В публикации № 25 Серии изданий МАГАТЭ по здоровью человека [22] указывается:

«МФКК играют ведущую роль в подготовке технических требований к оборудованию в соответствии с потребностями центра [радиационной медицины], они участвуют в оценке тендера и разработке рекомендаций в отношении приобретения оборудования. Они анализируют функциональные требования в отношении клинического использования оборудования и определяют необходимые условия для интеграции, совместимости и возможности подключения приобретаемого оборудования к существующему оборудованию».

Применяя эти принципы, МФКК участвуют в следующих аспектах подготовки к использованию инструментов на основе ИИ:

- a) установление функциональных характеристик приобретаемых инструментов на основе ИИ;
- b) определение потенциальных поставщиков/продуктов для планируемого клинического применения;
- c) сбор информации для определения окончательных характеристик продукта, которые используются при закупке. В ходе этого процесса может выясниться, что первоначальные функциональные требования нуждаются в корректировке или что для их выполнения необходимо предусмотреть более подходящие функции или продукты. Это исследование желательно начинать с нескольких потенциально подходящих продуктов, что даст возможность сравнительной оценки нескольких продуктов на основе систем, которые обеспечивают/поддерживают выполнение, по сути, одной и той же клинической задачи. Как правило, МФКК будет:
 - i) изучать основную документацию о системе от поставщиков и доступную литературу, чтобы узнать как можно больше о системах, определить характеристики встроенной модели/процессора ИИ, включая эффективность выполнения поставленной задачи, функции безопасности, обобщаемость, возможность интерпретации и возможность/необходимость обучения на основе имеющихся в учреждении данных, а также применяемые аппаратные средства. Часть этой информации можно найти в общих технических характеристиках, предоставляемых производителями, но обычно требуется более подробная документация. Для осмысленной интерпретации этой информации необходимо детальное знание исходных условий, наборов данных для обучения и валидации, а также математических моделей и параметров, которые использовались для количественного измерения эффективности системы;
 - ii) проводить систематическую работу по оценке опыта пользователей аналогичных инструментов на основе ИИ;
 - iii) получать тестовую версию наиболее подходящих продуктов в учреждении и систематически проводить сквозные тесты, тесты удобства использования и т.д. с участием всего коллектива специалистов клиники. Особого внимания требует тестирование работы системы на местных данных;

- iv) изучать возможности встраивания инструмента на основе ИИ в существующую ИТ-инфраструктуру;
- d) МФКК вносит вклад в разработку функциональных и технических характеристик системы, которые будут использоваться для закупок, на основе окончательных функциональных требований и технической/функциональной информации, собранной на этапе подготовки к закупкам;
- e) МФКК участвует в оценке тендеров и предложений, делясь своими соображениями, особенно в отношении физических и технических аспектов и аспектов безопасности;
- f) совместно с коллективом и руководством клиники МФКК удостоверяется в том, что представленные предложения согласуются с национальными и международными рекомендациями и законодательством (например, [15, 72]);
- g) МФКК участвует в заключительных переговорах с поставщиками, где обсуждаются соображения относительно физических и технических аспектов, а также аспектов безопасности. Частью окончательной заявки на поставку является детальный протокол валидации и приемки, охватывающий все аспекты эффективности, безопасности и эксплуатации и основанный на соответствующих согласованных параметрах;
- h) необходимо также заключить договоренность о поддержке поставщиком обучения на местных данных (если применимо), участии поставщика в техническом обслуживании (например, в обновлении модели) и обучении членов коллектива безопасному, эффективному и результативному клиническому использованию системы.

4.2. ПРИЕМКА И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

В публикации № 25 Серии изданий МАГАТЭ по здоровью человека [22] указывается:

«После установки нового оборудования МФКК отвечают за определение основных норм, которые должны быть применены для приемки и последующего ввода оборудования в клиническую эксплуатацию. Они обеспечивают функционирование всех установок и систем в соответствии с их технической спецификацией и предоставляют рекомендации относительно любых отклонений в работе оборудования от приемлемых критериев». «К обязанностям МФКК... относится также проверка компьютерных систем и алгоритмов, относящихся к новому оборудованию, и обеспечение их соответствия требованиям безопасного и эффективного клинического использования».

Адаптируя эти принципы к внедрению инструментов на основе ИИ в клинике, МФКК будут заниматься техническими аспектами приемки и ввода в эксплуатацию, описанными ниже.

- a) МФКК обеспечивает приемку и ввод в эксплуатацию системы ИИ в соответствии с национальными и международными рекомендациями и законодательством (например, [15, 72]).

- b) Если в отделе есть эксперты по ИТ, МФКК координирует переговоры между ними и поставщиком по установке продукта на основе ИИ, который должен быть совместим с существующей ИТ-инфраструктурой.
- c) После установки оборудования поставщиком МФКК проводит согласованные приемочные испытания и демонстрирует соответствие оборудования характеристикам, описанным в договоре с поставщиком. В зависимости от клинического назначения закупаемой системы ИИ к этому процессу могут быть подключены и другие специалисты, входящие в коллектив работников клиники. В случае расхождений возможные решения могут быть найдены путем анализа и обсуждения ситуации с поставщиком. Если отклонения сохраняются, МФКК обсуждает возможные клинические последствия с коллективом клинических специалистов. МФКК оказывает помощь руководству в случае повторных переговоров с поставщиком, особенно если предметом дискуссии являются технические характеристики или безопасность.
- d) Под руководством МФКК проводится окончательная оценка характеристик системы с использованием стандартных наборов данных для валидации и/или местных данных. Обучение системы также может вестись на основе местных данных. В обоих случаях МФКК отвечает за сбор данных в соответствующем объеме и надлежащего качества, а также, если это необходимо, за курирование данных. В случае обучения на местных данных окончательная валидация обычно может проводиться на отдельном местном наборе данных, который не использовался в процессе обучения. Характеристики сравниваются с критериями, указанными в протоколе приемки, а также с характеристиками, заявленными поставщиком или другими пользователями (если они применимы и известны).
- e) В случае обновления системы или модели под руководством МФКК проводится новый раунд приемки/ввода в эксплуатацию. Часто это предполагает повторение испытаний, проводившихся при первоначальных приемочных испытаниях.

4.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ И ЛЕЧЕБНЫХ ПРОЦЕДУР

Как и в случае с любой практикой, связанной с «медицинским радиологическим оборудованием и программным обеспечением, которое может повлиять на проведение процедур медицинского облучения», рекомендуется, чтобы практика использования технологий на основе ИИ опиралась, помимо национальных правил радиационной защиты, на Международные основные нормы безопасности [73].

- a) В соответствующих случаях МФКК будет сотрудничать с врачом-клиницистом, обеспечивая оптимизацию защиты и безопасности процессов с использованием инструментов на основе ИИ.
- b) Использование инструментов на основе ИИ может повлиять на эффективность обследования, а также на качество и восприятие изображений. В соответствующих случаях МФКК будет оказывать помощь врачу — специалисту по радиационной медицине в их оценке.

4.4. МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ И АСПЕКТОВ БЕЗОПАСНОСТИ

Как и при любом повседневном использовании медицинского оборудования, если инструменты на основе ИИ применяются для медицинского использования излучений, МФКК «участвует в качестве члена коллектива в разработке и внедрении программы менеджмента качества» [22], неся особую ответственность за технические и физические аспекты программы гарантии качества. Ниже приведен список обязанностей, имеющих отношение к МФКК. Он не является исчерпывающим.

- a) Под руководством МФКК выполняется официальная процедура оценки рисков перед первым клиническим использованием инструмента. Оценка рисков используется для выявления возможных рисков безопасности и эффективности при клиническом использовании инструмента на основе ИИ, а также для определения уровней действий и процессов, которые могут снизить риски в случае их возникновения. Результаты оценки рисков учитываются при разработке протоколов клинического применения и гарантии качества системы.
- b) Вместе со всем коллективом специалистов клиники МФКК составляет протокол с руководящими указаниями по клиническому использованию инструмента на основе ИИ. В нем определяются общий рабочий процесс, рабочие инструкции и точные функции и обязанности всех членов коллектива. Протокол должен обеспечивать, чтобы система использовалась правильно и безопасно и чтобы ее рабочие показатели, полученные на этапе приемки, были достигнуты и в повседневной клинической практике или даже улучшены, например в случае ручной корректировки выходных данных системы ИИ. Необходимо подготовить четкое описание:
 - i) конкретной формы применения инструмента на основе ИИ (например, типа(ов) визуализации, мест(а) опухоли);
 - ii) необходимых входных данных для инструмента на основе ИИ;
 - iii) ожидаемых выходных данных инструмента на основе ИИ и способа интерпретации результатов применения ИИ.
- c) С течением времени контингент пациентов, протоколы визуализации или лечения могут меняться. МФКК должны знать об этих изменениях (в идеале — получать предупреждения от системы, способной отслеживать изменения и оценивать их влияние на работу инструмента на основе ИИ) и реагировать на них вместе с другими членами коллектива, чтобы обеспечить дальнейшее эффективное и безопасное использование инструмента на основе ИИ.
- d) МФКК берет на себя ведущую роль в разработке и внедрении программы ГК для системы ИИ, которая необходима для обеспечения качества и безопасности ее использования, например составляет подробное описание тестов, которые должны выполняться на регулярной основе. Эта программа обеспечивает постоянство выходных данных системы ИИ с течением времени, например путем получения одного и того же стандартизированного набора тестовых изображений и сравнения полученных результатов с базовыми, полученными при приемке/вводе в эксплуатацию.

- e) В случае обновления системы или модели МФКК отвечает за качество и безопасность внедряемой обновленной модели, в том числе за приемку и ввод в эксплуатацию (раздел 4.2), адаптацию протокола ГК (если требуется) и обучение коллектива клинических специалистов.
- f) Обо всех проблемах безопасности и эффективности, которые могут возникнуть при клиническом использовании системы, необходимо сообщать МФКК, который займется их дальнейшим анализом. Кроме того, под руководством МФКК составляется отчетность и проводятся переговоры с поставщиком.

4.5. ОБУЧЕНИЕ И ПОДГОТОВКА ДРУГИХ МЕДИЦИНСКИХ РАБОТНИКОВ

Клинические инструменты на основе ИИ пока не получили широкого распространения в сфере медицинского использования излучений из-за их высокой сложности и быстрого развития. Не все члены коллектива, участвующего в клиническом применении ИИ, будут непременно обладать достаточными теоретическими знаниями или навыками для его безопасного и эффективного использования. Поэтому теоретическую подготовку необходимо дополнить практическим обучением. МФКК участвует в процессе непрерывного повышения квалификации, включающем в себя приобретение дополнительных компетенций, которые потребуются ему для выполнения своих функций по обеспечению безопасного и эффективного применения инструмента на основе ИИ. В свою очередь, МФКК будет оказывать поддержку коллективу посредством:

- a) участия в оценке потребностей других членов коллектива в обучении и подготовке;
- b) содействия удовлетворению потребностей в обучении и подготовке, например путем чтения лекций или поиска возможностей для обучения и подготовки в других местах. Если обучение организуется поставщиком, МФКК анализирует и критически оценивает содержание и программу обучения, а также предлагает изменения, если они будут сочтены необходимыми для безопасного, эффективного и результативного использования систем ИИ;
- c) оценки подготовленности и навыков специалистов по ИТ, которые будут участвовать в установке и/или техническом обслуживании и ГК инструмента на основе ИИ, в части, касающейся установки и использования инструментов на основе ИИ;
- d) выполнения функций куратора и руководителя обучения ординаторов и студентов коллектива клиники теоретическим знаниям и навыкам, необходимым для безопасного, эффективного и результативного клинического использования системы ИИ.

4.6. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Клиническое использование ИИ сулит большие перспективы, но во многих случаях его оценка пока еще вызывает трудности, а сфера применения ограничена. По этим причинам перед всеми членами коллектива клинических специалистов, включая МФКК, открывается широкий простор для исследовательской работы.

- a) МФКК могут заниматься научными исследованиями и разработками, посвященными техническим аспектам инструментов на основе ИИ и их применения.

- b) Вместе с исследовательской группой МФКК следит за тем, чтобы были учтены соответствующие рекомендации по отчетности в части, касающейся методологии исследования (см. раздел 3.3).
- c) МФКК может изучать внедрение новых процедур на основе ИИ, оценивать клиническую эффективность существующих систем или сделать предметом научного исследования повышение эффективности систем, например за счет их лучшего обучения, более грамотного или широкого использования. МФКК также может участвовать в разработке и развитии методологий для эффективного технического обслуживания и ГК клинических систем ИИ.

5. ПРИОБРЕТЕНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ В ОБЛАСТИ ИИ

Предполагается, что нынешние и будущие МФКК научатся эффективно и безопасно вводить в эксплуатацию, применять и обслуживать системы ИИ, связанные с медицинской физикой, и гарантировать их качество. Ожидается, что они смогут выполнять обязанности, описанные в разделе 4. Поэтому крайне важно, чтобы они приобрели необходимые базовые знания, о которых говорится ниже в данном разделе. Для ликвидации пробелов в знаниях у нынешних и будущих МФКК было определено два способа: один реализуется через последиplomные программы академической подготовки студентов по медицинской физике (раздел 5.1), другой — это возможность непрерывного повышения квалификации МФКК (раздел 5.2).

5.1. ПОСЛЕДИПЛОМНЫЕ ПРОГРАММЫ АКАДЕМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПО МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКЕ

Академический модуль, входящий в эту программу, имеет целью ознакомление будущих МФКК с принципами работы систем, основанных на ИИ, входными и выходными данными, а также с используемыми базовыми подходами.

В дополнение к основным модулям, определенным в публикации Серии учебных курсов МАГАТЭ, № 56 (Rev. 1) [28], в программу в качестве факультатива включен предмет «Прогрессивные статистические методы», который может преподаваться при наличии соответствующих экспертных знаний и ресурсов.

Рекомендуется, чтобы студенты предварительно прошли обучение по следующим темам:

фундаментальная статистика, включая центральную предельную теорему; основные функции и применения вероятности; тестирование статистических заключений и оценку статистической значимости; статистические ошибки первого и второго рода; расчеты статистической мощности и размера выборки; дисперсионный анализ (ANOVA);

основы вычислительного программирования, включая управление файлами стандарта DICOM и извлечение соответствующих данных, а также написание сценариев для анализа данных и изображений и их графического представления (например, Python, R, Octave).

5.1.1. Обзор прогрессивных статистических методов

Этот факультативный модуль рассчитан на студентов, изучающих медицинскую физику и знакомых с основами безопасного, эффективного и результативного использования ИИ, и ожидается, что его содержание будет преподаваться на уровне, позволяющем студентам получить достаточные знания и навыки. При введении в программу этого модуля не должны страдать количество, качество и продолжительность основных модулей, перечисленных в публикации Серии учебных курсов МАГАТЭ, № 56 (Rev. 1) [28]. Таким образом, это может отразиться на общей продолжительности академической программы.

Ниже вкратце описывается содержание этого модуля.

- a) Введение
 - i) История развития ИИ
 - ii) Роль медицинского физика
- b) Логистическая регрессия для прогнозного моделирования
 - i) Определение и интерпретация логистической и логит-функции
 - ii) Проблема, данные, модель, подбор параметров и оценка для логистической регрессии
- c) Регрессия, классификация и определение границы принятия решений
 - i) Разница между регрессией и классификацией
 - ii) Преобразование проблемы из одного типа в другой
 - iii) Интерпретация результатов применения каждой модели
- d) Анализы методом характеристических кривых обнаружения (ROC)
 - i) Базовая концепция и толкование
 - ii) Истинно положительный, истинно отрицательный, ложно положительный, ложно отрицательный
 - iii) Ошибки первого и второго рода
 - iv) Чувствительность и специфичность
 - v) Площадь под кривой (AUC)
- e) Ковариация, корреляция, регрессия, R^2
 - i) Определения и толкования
 - ii) Анализ
- f) Категории машинного обучения
 - i) Обучение с учителем
 - ii) Обучение без учителя
 - iii) Обучение с подкреплением
 - iv) Категории гибридного обучения
 - Обучение с частичным привлечением учителя
 - Обучение с самоконтролем
- g) Модели машинного обучения и инструменты анализа данных
 - i) Линейная и логистическая регрессия
 - ii) Нейронные сети
 - iii) Снижение размерности (например, анализ главных компонент)
 - iv) Машина опорных векторов
 - v) Деревья решений и случайные леса
 - vi) Градиентный бустинг

- vii) Кластерный анализ методом K-средних
- viii) Метрики оценки (например, матрица неточностей)
- h) Обучение и валидация моделей машинного обучения
 - i) Математика обучения (например, функция потерь, обратное распространение, оптимизация)
 - ii) Аугментация данных
 - iii) Выбор и регуляризация модели
 - Прямой и обратный пошаговый выбор предикторов
 - Гребневая регрессия
 - LASSO
 - iv) Методы обучения
 - v) Оптимизация гиперпараметров
 - vi) Требуемый размер выборки
 - vii) Компромисс между смещением и дисперсией
 - viii) Переобучение
 - ix) Работа с коллинеарными предикторами (фактор, увеличивающий дисперсию, VIF)
 - x) Валидация модели
 - Кросс-валидация (K-кратная, с исключением)
 - Бутстрэп
 - Обобщаемость
 - Внешняя валидация
 - Калибровка
- i) Глубокое обучение
 - i) Глубокое обучение и нейронные сети
 - ii) Сверточные нейронные сети
 - iii) Рекуррентные нейронные сети
 - Сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM)
 - iv) Трансформеры
 - Трансформеры для обработки текста
 - Трансформеры Vision и Swin для обработки изображений
 - v) Генеративно-состязательные сети (GAN) (например, синтетические изображения)
 - vi) Трансферное обучение
 - Доменная адаптация

- vii) Аугментация
- viii) Метрики оценки (например, DICE)
- j) Управление данными
 - i) Сбор данных, включая поиск данных
 - ii) Оценка качества данных (размер выборки, дисбаланс)
 - iii) Курирование данных
 - Анонимизация и удаление идентификационной информации
 - Мечение и сегментация
 - Согласование
 - Стандартизация
 - Устойчивость
- k) Трудности и узкие места, связанные с применением ИИ в медицине
 - i) Анализ рисков
 - ii) Дрейф модели и дрейф данных
- l) Проблемы нормативного регулирования
- m) Обзор клинического применения систем на основе ИИ
- n) Этические проблемы, связанные с ИИ

5.1.2. Практические занятия

Практические занятия необходимы для дополнения обучения студентов и формирования навыков в рамках образовательной программы. Из-за сходства моделей ИИ одно практическое занятие может быть посвящено одновременно нескольким темам и академическим модулям. Ниже приведены примеры практических занятий и тех областей знаний, к которым они относятся.

- a) Обучение одной модели классификации и одной модели регрессии
 - i) Выбор подходящей модели и стратегии настройки
 - ii) Влияние размера базы данных (переобучение и обобщаемость)
 - iii) Тестирование и валидация модели на основе ИИ
 - iv) Регуляризация модели на основе ИИ
 - v) Определение качества модели
- b) Обучение одной модели ГО, используемой для сегментации изображений
 - i) Понимание влияния входных данных на работу модели
 - ii) Тестирование и валидация модели на основе ИИ
 - iii) Регуляризация модели на основе ИИ
 - iv) Влияние разных архитектур

- v) Определение качества модели
 - vi) Трансферное обучение
- c) Оценка сегментации на основе ГО для применения в лучевой терапии
- i) Применение модели сегментации на основе ГО для сегментации критических органов и/или опухолевой ткани на наборе компьютерных томограмм
 - ii) Оценка того, насколько хорошо сегментация на основе ГО согласуется с клинической сегментацией
 - iii) Оценка того, как в модели ГО отображается неопределенность сегментации
 - iv) Составление плана лечения с использованием как сегментации на основе ГО, так и клинической сегментации и оценка различий в качестве плана
- d) Оценка ИИ при его применении для радиологического обнаружения (например, обнаружения и классификации узлов в легких, классификации рентгеновских снимков грудной клетки)
- i) Применение модели ГО для обнаружения и классификации потенциальных заболеваний на новом наборе медицинских изображений (например, рентгенограмм, компьютерных томограмм и маммограмм)
 - ii) Оценка точности обнаружения заболеваний в зависимости от модели и оценка точности работы модели при обнаружении менее распространенных заболеваний
 - iii) Оценка точности локализации очага заболевания. Если модель не предлагает локализовать очаг напрямую, оценка визуальных методов объяснения принятых моделью решений
 - iv) Оценка того, как модель указывает на неопределенность в своем решении
 - v) Оценка того, влияет ли наличие ложно положительных и ложно отрицательных результатов на дальнейший курс лечения
- e) Оценка реконструкции изображений, полученных при визуализации с низкой мощностью дозы
- i) Применение модели ГО для реконструкции изображений «диагностического качества» по изображениям, полученным при низкой дозе облучения, при наличии известных изображений из контрольного набора данных. Такие наборы данных, возможно, потребуется сформировать, если они не имеются в открытом доступе
 - ii) Оценка точности реконструированных изображений. Определение того, есть ли на изображении области, например определенные ткани, где между реконструированным изображением и оригиналом постоянно наблюдаются различия
 - iii) Оценка точности реконструированного изображения в присутствии артефактов или источников артефактов (например, металлических объектов при КТ). Анализ того, как присутствие артефактов влияет на реконструированные изображения

- iv) Обсуждение клинических последствий реконструкции и попытка понять, может ли использование реконструированных изображений повлиять на клинические решения (например, оценка того, будут ли при реконструкции изображения «диагностического качества» упущены из виду или привнесены мелкие легочные узлы; оценка того, ухудшится ли качество плана лучевой терапии, составленного на основе таких реконструированных изображений)

Могут быть предусмотрены и другие учебные мероприятия, аналогичные перечисленным выше и посвященные тем же или другим академическим предметам.

5.1.3. Источники знаний

Ниже приводится список источников, которые могут быть использованы для разработки программы. Некоторые из них имеются в электронном виде. Существуют бесплатно загружаемые платформы машинного обучения, которые могут быть использованы (например, TensorFlow, PyTorch, scikit-learn, mlr3 и т.д.).

а) Основные источники

- i) JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., An Introduction to Statistical Learning. Springer, New York (2013).
- ii) HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., FRIEDMAN, J.H., The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer, New York (2009).
- iii) FLACH, P., Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. Cambridge University Press (2012).
- iv) GOODFELLOW, I., BENGIO, Y., COURVILLE, A., Deep learning, MIT Press (2016).
- v) BISHOP, C.M., NASRABADI, N.M., Pattern recognition and machine learning, Springer, New York (2006).
- vi) BISHOP, C.M., Neural networks for pattern recognition. Oxford University Press (1995).

б) Дополнительные источники

- i) BURKOV, A., The hundred-page machine learning book. Quebec City, QC, Canada: Andriy Burkov (2019).
- ii) PATTERSON, J., GIBSON, A., Deep learning: A practitioner's approach. O'Reilly Media, Inc (2017).
- iii) LAPAN, M., Deep reinforcement learning hands-on. Packt publishing (2020).
- iv) THEOBALD, O., Machine Learning For Absolute Beginners: A Plain English Introduction. Scatterplot press (2017).
- v) SEGARAN, T., Programming Collective Intelligence: Building Smart Web 2.0 Applications. O'Reilly Media, Inc (2007).

- vi) MURPHY, K.P., Machine Learning: A Probabilistic Perspective. MIT Press (2012).
- vii) MÜLLER, A.C., GUIDO, S., Introduction to Machine Learning with Python: a guide for data scientists. O'Reilly Media, Inc (2016).
- viii) RASCHKA, S., Python machine learning. Packt Publishing Ltd (2015).
- ix) REED, R., MARKS II, R.J., Neural Smithing: Supervised Learning in Feedforward Artificial Neural Networks. MIT Press (1999).
- x) STEVENS, E., ANTIGA, L., VIEHMANN, T., Deep Learning with PyTorch. Manning Publications (2020).
- xi) CHOLLET, F., Deep Learning with Python. Manning Publications (2021).
- xii) TRASK, A.W., Grokking deep learning. Manning Publications (2019).
- xiii) GÉRON, A., Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. O'Reilly Media, Inc (2019).
- xiv) SHUKLA, N., FRICK LAS, K., Machine learning with TensorFlow. Manning Publications (2018).

5.2. СОХРАНЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ФИЗИКОВ КЛИНИЧЕСКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ

В публикации № 71 Серии учебных курсов МАГАТЭ [74] указывается:

«МФКК должны постоянно обновлять свои знания и компетенции, идя в ногу с развитием науки и технологий. Поэтому ожидается, что МФКК будут не только соблюдать требуемые стандарты в своей практике, но и активно стремиться к сохранению и повышению уровня знаний и компетентности».

Ввиду ожидаемого роста числа клинических процессов, которые будут основываться на ИИ (см. раздел 3.1), сопутствующих рисков (см. раздел 0), а также расширения функций и обязанностей МФКК в области клинического применения систем ИИ (см. раздел 4) рекомендуется организовать деятельность по НПК на местах. В зависимости от профессионального опыта клинического применения систем ИИ предлагается проводить разноплановые мероприятия по повышению квалификации. В таблице 4 приводится список возможных курсов НПК и их содержание, учитывающее предыдущий опыт работы МФКК. Принципы этой деятельности рассматриваются в нижеследующих подразделах.

ТАБЛИЦА 4. МЕРОПРИЯТИЯ ПО НЕПРЕРЫВНОМУ ПОВЫШЕНИЮ
КВАЛИФИКАЦИИ МФКК В СФЕРЕ ИИ

Содержание курса	Тип курса	Целевая аудитория МФКК
Обзор современных инструментов на основе ИИ в МФ	Теоретические занятия	По мере необходимости
Теоретические принципы ИИ глазами пользователя	Теоретические занятия; факультативные практические занятия	Необходим для МФКК, занимающихся применением любой системы ИИ в любой области МФ
Общие подходы и сведения об обучении, валидации, применении и ГК данных в сфере ИИ	Теоретические занятия; рекомендуются практические занятия	Рекомендуется для МФКК, занимающихся применением системы любого типа на основе ИИ в одной конкретной области МФ
Наилучшая практика применения инструментов на основе ИИ для решения конкретной клинической задачи	Теоретические и практические занятия	Рекомендуется для МФКК, занимающихся применением одной конкретной системы на основе ИИ в одной конкретной области МФ
Теоретические принципы ИИ глазами разработчика	Теоретические и интенсивные практические занятия	Факультативный курс для МФКК, занимающихся исследованием и разработкой клинических моделей ИИ

5.2.1. Инструменты на основе ИИ в области МФ

Знакомство с современными инструментами на основе ИИ в медицинской физике позволит МФКК получить общее представление о разработке и использовании технологий ИИ в этой области. На этих курсах предполагается не только рассказывать об инструментах на основе ИИ, используемых в медицинской физике в настоящее время, но и дать некоторое понятие об инструментах, которые, по всей видимости, станут неотъемлемой частью клинической практики в будущем. На них может быть дана общая информация о предметных областях, с которыми могут иметь дело МФКК, таких как получение изображений и стандартизация данных визуализации, обнаружение поражений, реконструкция изображений, создание синтетических изображений, оценка дозы, оптимизация, сегментация, планирование лечения, гарантия качества, проведение лечебных процедур, последующее наблюдение и т.д. Предполагается, что арсенал инструментов на основе ИИ, используемых в медицинской физике, будет развиваться с

течением времени, по мере того как будут меняться обязанности и принципы деятельности МФКК, и поэтому для сохранения актуальности курсов может потребоваться частое обновление учебной программы. Поскольку на этих курсах не будет идти речь о конкретных инструментах на основе ИИ в клинике, они будут рассчитаны на МФКК, которые стремятся участвовать в будущем внедрении и использовании таких технологий.

5.2.2. Теоретические принципы ИИ глазами пользователя

Для безопасного и эффективного использования ИИ в клинике важно, чтобы МФКК получил базовые теоретические знания в области ИИ, прежде чем приступать к реализации клинических проектов. Частью программы является знакомство с теоретическими принципами в основных областях, перечисленных в разделе 5.1.1, но без углубления в технические подробности и без анализа вопросов с точки зрения разработчика. Это позволит решить проблему неоптимального и медленного внедрения систем в клиническую практику, а также изменить отношение к моделям ИИ как к непостижимым «черным ящикам». МФКК не рекомендуется приступать к клиническому применению систем ИИ, пока они не разберутся в принципах их работы и характеристиках необходимых входных и выходных данных. Эти курсы могут проводиться для того, чтобы МФКК эффективно использовали технологии ИИ, применяемые в клинике. МФКК научатся не только использовать технологии, но и интерпретировать результаты, определять, когда эффективность модели снижается или когда она дает неверные прогнозы, и устранять проблемы (с точки зрения пользователя) при их возникновении.

5.2.3. Общий обзор клинического применения систем ИИ

Эти курсы разработаны и предназначены для того, чтобы дать МФКК понятие о существующих общепринятых методах обучения, валидации и клинического применения технологий ИИ. На них могут также разбираться потенциальные проблемы, трудности и препятствия при интеграции, вводе в эксплуатацию, валидации и установке модели для клинического использования. Это откроет для МФКК общий путь к клиническому применению рассматриваемой системы и облегчит поиск и устранение проблем.

Кроме того, после установки системы МФКК могут быть обучены анализу рисков, вопросам ГК, обслуживания и обновления таких технологий. Многие модели, основанные на данных, могут становиться менее эффективными по мере того, как распределение данных постепенно меняется в силу действия ряда факторов, таких как демографический дрейф контингента пациентов, развитие медицинских технологий, клиническая практика, совершенствование протоколов и т.д.

5.2.4. Наилучшая практика применения инструментов на основе ИИ для решения конкретной клинической задачи

Эти курсы ориентированы на конкретную предметную область, такую как диагностика, реконструкция изображений, оценка дозы, оптимизация, сегментация, планирование лечения, гарантия качества, проведение лечебных процедур, последующее наблюдение и т.д., и на них рассматриваются критерии приобретения/выбора оборудования, конкретные методы разработки технологий ИИ и области их применения для решения клинических задач. Поэтому на них могут разбираться примеры конкретных

клинических задач, чтобы МФКК могли лучше понять суть соответствующих процессов. Рекомендуется проводить практические занятия по разбору примеров клинических задач, чтобы МФКК могли приобрести практический опыт.

5.2.5. Теоретические принципы ИИ глазами разработчика

Курсы по математическим моделям, теоретическим принципам и концепциям ИИ с точки зрения разработчика доступны в режиме онлайн. Обучение на таких курсах практично и эффективно. В программу обычно входят интенсивные практические занятия по кодированию и разработке моделей ИИ. Эти курсы рекомендованы в первую очередь для МФКК, занимающихся исследованием и разработкой клинических моделей ИИ. Поскольку сфера ИИ постоянно и быстро развивается, содержание курсов должно идти в ногу с этой тенденцией и полнее отражать основные технологические новшества. Ниже приведены некоторые примеры курсов, доступных в настоящее время.

- a) «Machine Learning Specialization» («Специальный курс по машинному обучению»), разработан Stanford Online и DeepLearning.AI (предлагается на сайте Coursera по адресу <https://www.coursera.org/specializations/machine-learning-introduction>)
- b) «Deep Learning Specialization» («Специальный курс по глубокому обучению»), разработан DeepLearning.AI (предлагается на сайте Coursera по адресу <https://www.coursera.org/specializations/deep-learning>)
- c) «Machine Learning Crash Course» («Краткий курс по машинному обучению») (предлагается Google AI на сайте <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course>)
- d) «Deep Learning A-Z: Hands-On Artificial Neural Networks» («Глубокое обучение от А до Я: искусственные нейронные сети на практике») (предлагается на сайте Udey по адресу <https://www.udemy.com/course/deeplearning/>)

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МФКК — это работники здравоохранения, которые отвечают за выбор, безопасное внедрение и использование инструментов на основе ИИ, применяемых при медицинском использовании излучений. В данной публикации описаны их функции и обязанности в этой системе. Чтобы управлять инструментами на основе ИИ со знанием дела, МФКК должны обладать специальными компетенциями; кроме того, они нуждаются в НПК. В данной публикации представлено подробное описание факультативного модуля «Прогрессивные статистические методы» последиplomных программ академической подготовки по медицинской физике, который может преподаваться при наличии соответствующих экспертных знаний и ресурсов. Кроме того, рассматриваются принципы и потребности НПК в области ИИ и предлагаются разноплановые мероприятия, связанные с НПК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] XING, L., GIGER, M.L., MIN, J.K., Artificial Intelligence in Medicine: Technical Basis and Clinical Applications, Academic Press, London, UK (2020).
- [2] MCCARTHY, J., MINSKY, M.L., ROCHESTER, N., SHANNON, C.E., A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence - August 31, 1955, AI Magazine. 27 (2006) 12-14.
- [3] GIGER, M.L., CHAN, H.P., BOONE, J., Anniversary Paper: History and status of CAD and quantitative image analysis: The role of Medical Physics and AAPM, Med Phys. 35 (2008) 5799-5820.
- [4] ZHANG, W., et al., Computerized Detection of Clustered Microcalcifications in Digital Mammograms Using a Shift-Invariant Artificial Neural-Network, Med Phys. 21 (1994) 517-524.
- [5] AVANZO, M., et al., Machine and deep learning methods for radiomics, Med Phys. 47 (2020) E185-E202.
- [6] SAHINER, B., et al., Deep learning in medical imaging and radiation therapy, Med Phys. 46 (2019) e1-e36.
- [7] KRIZHEVSKY, A., SUTSKEVER, I., HINTON, G.E., ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, COMMUNICATIONS OF THE ACM. 60 (2017) 84-90.
- [8] AGGARWAL, N., et al., Advancing Artificial Intelligence in Health Settings Outside the Hospital and Clinic, NAM Perspect. 2020 (2020) 1-26.
- [9] BOHR, A., MEMARZADEH, K., "Chapter 2 - The rise of artificial intelligence in healthcare applications", Artificial Intelligence in Healthcare, Academic Press, London, UK (2020) 25-60.
- [10] VAYENA, E., BLASIMME, A., Biomedical Big Data: New Models of Control Over Access, Use and Governance, J Bioethic Inq. 14 (2017) 501-513.
- [11] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Ethics and governance of artificial intelligence for health, WHO, Geneva (2021).
- [12] AUNG, Y.Y.M., WONG, D.C.S., TING, D.S.W., The promise of artificial intelligence: a review of the opportunities and challenges of artificial intelligence in healthcare, Br Med Bull. 139 (2021) 4-15.
- [13] LANGLITZ, C.P., Will Artificial Intelligence Replace Radiologists?, Radiol-Artif Intell. 1 (2019)
- [14] PESAPANE, F., et al., Myths and facts about artificial intelligence: why machine- and deep-learning will not replace interventional radiologists, Med Oncol. 37 (2020)
- [15] U.S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA), Artificial Intelligence/Machine Learning (AI/ML)-Based Software as a Medical Device (SaMD) Action Plan, FDA, Silver Spring, Maryland, USA (2021).
- [16] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, Recommendation of the Council on Artificial Intelligence, OECD/LEGAL/0449, OECD LEGAL INSTRUMENTS, (2019).
- [17] EUROPEAN COMMISSION EXPERT GROUP ON LIABILITY AND NEW TECHNOLOGIES, Liability for Artificial Intelligence and other emerging digital technologies, EUROPEAN COMMISSION (EC), (2019).
- [18] MATHENY, M.E., WHICHER, D., THADANEY ISRANI, S., Artificial Intelligence in Health Care: A Report From the National Academy of Medicine, JAMA. 323 (2020) 509-510.
- [19] REDDY, S., ALLAN, S., COGHLAN, S., COOPER, P., A governance model for the application of AI in health care, J Am Med Inform Assn. 27 (2020) 491-497.

- [20] WIENS, J., et al., Do no harm: a roadmap for responsible machine learning for health care, *Nat Med.* 25 (2019) 1337-1340.
- [21] XING, L., KRUPINSKI, E.A., CAI, J., Artificial intelligence will soon change the landscape of medical physics research and practice, *Med Phys.* 45 (2018) 1791-1793.
- [22] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Функции, обязанности и требования к образованию и профессиональной подготовке медицинских физиков клинической квалификации, Серия изданий по здоровью человека, № 25, МАГАТЭ, Вена (2014).
- [23] ANDERSSON, J., et al., Artificial intelligence and the medical physics profession-A Swedish perspective, *Phys Medica.* 88 (2021) 218-225.
- [24] ZANCA, F., et al., Expanding the medical physicist curricular and professional programme to include Artificial Intelligence, *Phys Medica.* 83 (2021) 174-183.
- [25] XING, L., GOETSCH, S., CAI, J., Artificial intelligence should be part of medical physics graduate program curriculum, *Med Phys.* 48 (2021) 1457-1460.
- [26] NG, K.H., WONG, J.H.D., A clarion call to introduce artificial intelligence (AI) in postgraduate medical physics curriculum, *Phys Eng Sci Med.* 45 (2022) 1-2.
- [27] DIAZ, O., GUIDI, G., IVASHCHENKO, O., COLGAN, N., ZANCA, F., Artificial intelligence in the medical physics community: An international survey, *Phys Med.* 81 (2021) 141-146.
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Postgraduate Medical Physics Academic Programmes, Training Course Series No. 56 (Rev. 1), Vienna (2021).
- [29] IBRAGIMOV, B., XING, L., Segmentation of organs-at-risks in head and neck CT images using convolutional neural networks, *Med Phys.* 44 (2017) 547-557.
- [30] SEO, H., HUANG, C., BASSENNE, M., XIAO, R., XING, L., Modified U-Net (mU-Net) With Incorporation of Object-Dependent High Level Features for Improved Liver and Liver-Tumor Segmentation in CT Images, *IEEE Trans Med Imaging.* 39 (2020) 1316-1325.
- [31] ISLAM, M., XING, L., A data-driven dimensionality-reduction algorithm for the exploration of patterns in biomedical data, *Nature Biomedical Engineering.* 5 (2021) 624-635.
- [32] SHEN, L., ZHAO, W., XING, L., Patient-specific reconstruction of volumetric computed tomography images from a single projection view via deep learning, *Nature Biomedical Engineering.* 3 (2019) 880-888.
- [33] LI, X., et al., Transformation-Consistent Self-Ensembling Model for Semisupervised Medical Image Segmentation, *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst.* 32 (2021) 523-534.
- [34] MNIH, V., et al., Human-level control through deep reinforcement learning, *Nature.* 518 (2015) 529-533.
- [35] WANG, X., et al., ChestX-Ray8: Hospital-Scale Chest X-Ray Database and Benchmarks on Weakly-Supervised Classification and Localization of Common Thorax Diseases, (*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2017*), (2017) 3462–3471.
- [36] MAYO, C.S., et al., American Association of Physicists in Medicine Task Group 263: Standardizing Nomenclatures in Radiation Oncology, *Int J Radiat Oncol.* 100 (2018) 1057-1066.
- [37] SHEN, C.Y., et al., An introduction to deep learning in medical physics: advantages, potential, and challenges, *Phys Med Biol.* 65 (2020) 05TR01.
- [38] ZHANG, A., XING, L., ZOU, J., WU, J.C., Shifting machine learning for healthcare from development to deployment and from models to data, *Nature Biomedical Engineering.* 6 (2022) 1330-1345.

- [39] NETHERTON, T.J., CARDENAS, C.E., RHEE, D.J., COURT, L.E., BEADLE, B.M., The Emergence of Artificial Intelligence within Radiation Oncology Treatment Planning, *Oncology-Basel*. 99 (2021) 124-134.
- [40] CHALLEN, R., et al., Artificial intelligence, bias and clinical safety, *Bmj Qual Saf*. 28 (2019) 231-237.
- [41] ROBERTS, M., et al., Common pitfalls and recommendations for using machine learning to detect and prognosticate for COVID-19 using chest radiographs and CT scans, *Nat Mach Intell*. 3 (2021) 199-217.
- [42] MALIK, A., et al., Ten simple rules for engaging with artificial intelligence in biomedicine, *Plos Comput Biol*. 17 (2021) e1008531.
- [43] ZOU, J., SCHIEBINGER, L., Design AI so that it's fair, *Nature*. 559 (2018) 324-326.
- [44] SEYYED-KALANTARI, L., ZHANG, H.R., MCDERMOTT, M.B.A., CHEN, I.Y., GHASSEMI, M., Underdiagnosis bias of artificial intelligence algorithms applied to chest radiographs in under-served patient populations, *Nat Med*. 27 (2021) 2176-2182.
- [45] LARRAZABAL, A.J., NIETO, N., PETERSON, V., MILONE, D.H., FERRANTE, E., Gender imbalance in medical imaging datasets produces biased classifiers for computer-aided diagnosis, *P Natl Acad Sci USA*. 117 (2020) 12592-12594.
- [46] RAMESH, S., A checklist to protect human rights in artificial-intelligence research, *Nature*. 552 (2017) 334.
- [47] WACHINGER, C., RIECKMANN, A., POLSTERL, S., Detect and correct bias in multi-site neuroimaging datasets, *Med Image Anal*. 67 (2021) 101879.
- [48] ZHAO, Q.Y., ADELI, E., POHL, K.M., Training confounder-free deep learning models for medical applications, *Nat Commun*. 11 (2020) 6010.
- [49] DHONT, J., WOLFS, C., VERHAEGEN, F., Automatic coronavirus disease 2019 diagnosis based on chest radiography and deep learning - Success story or dataset bias?., *Med Phys*. 49 (2022) 978-987.
- [50] SUBBASWAMY, A., SARIA, S., From development to deployment: dataset shift, causality, and shift-stable models in health AI, *Biostatistics*. 21 (2020) 345-352.
- [51] FINLAYSON, S.G., et al., The Clinician and Dataset Shift in Artificial Intelligence, *New Engl J Med*. 385 (2021) 283-286.
- [52] CUI, S.N., TSENG, H.H., PAKELA, J., TEN HAKEN, R.K., EL NAQA, I., Introduction to machine and deep learning for medical physicists, *Med Phys*. 47 (2020) E127-E147.
- [53] ZECH, J.R., et al., Variable generalization performance of a deep learning model to detect pneumonia in chest radiographs: A cross-sectional study, *Plos Med*. 15 (2018) e1002683.
- [54] PARASURAMAN, R., MANZEY, D.H., Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration, *Hum Factors*. 52 (2010) 381-410.
- [55] KOHLI, A., JHA, S., Why CAD Failed in Mammography, *J Am Coll Radiol*. 15 (2018) 535-537.
- [56] GAUBE, S., et al., Do as AI say: susceptibility in deployment of clinical decision-aids, *Npj Digit Med*. 4 (2021) 31.
- [57] COLLINS, G.S., MOONS, K.G.M., Reporting of artificial intelligence prediction models, *Lancet*. 393 (2019) 1577-1579.
- [58] CROSSNOHERE, N.L., ELSAID, M., PASKETT, J., BOSE-BRILL, S., BRIDGES, J.F.P., Guidelines for Artificial Intelligence in Medicine: Literature Review and Content Analysis of Frameworks, *J Med Internet Res*. 24 (2022)
- [59] NORGEOT, B., et al., Minimum information about clinical artificial intelligence modeling: the MI-CLAIM checklist, *Nat Med*. 26 (2020) 1320-1324.

- [60] SOUNDERAJAH, V., et al., Developing a reporting guideline for artificial intelligence-centred diagnostic test accuracy studies: the STARD-AI protocol, *Bmj Open*. 11 (2021)
- [61] COLLINS, G.S., et al., Protocol for development of a reporting guideline (TRIPOD-AI) and risk of bias tool (PROBAST-AI) for diagnostic and prognostic prediction model studies based on artificial intelligence, *Bmj Open*. 11 (2021)
- [62] EL NAQA, I., et al., AI in Medical Physics Guidelines for publication, *Med Phys*. 48 (2021) 4711-4714.
- [63] BLUEMKE, D.A., et al., Assessing Radiology Research on Artificial Intelligence: A Brief Guide for Authors, Reviewers, and Readers - From the Radiology Editorial Board, *Radiology*. 294 (2020) 487-489.
- [64] MONGAN, J., MOY, L., KAHN, C.E., JR., Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): A Guide for Authors and Reviewers, *Radiol Artif Intell*. 2 (2020) e200029.
- [65] RIVERA, S.C., et al., Guidelines for clinical trial protocols for interventions involving artificial intelligence: the SPIRIT-AI extension, *Nat Med*. 26 (2020) 1351-1363.
- [66] LIU, X.X., et al., Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI extension, *Nat Med*. 26 (2020) 1364-1374.
- [67] BUVAT, I., ORLHAC, F., The TRUE Checklist for Identifying Impactful Artificial Intelligence-Based Findings in Nuclear Medicine: Is It True? Is It Reproducible? Is It Useful? Is It Explainable?, *J Nucl Med*. 62 (2021) 752-754.
- [68] JHA, A.K., et al., Nuclear Medicine and Artificial Intelligence: Best Practices for Evaluation (the RELAINCE Guidelines), *J Nucl Med*. 63 (2022) 1288-1299.
- [69] DE HOND, A.A.H., et al., Guidelines and quality criteria for artificial intelligence-based prediction models in healthcare: a scoping review, *Npj Digit Med*. 5 (2022) 2.
- [70] VASEY, B., et al., DECIDE-AI: new reporting guidelines to bridge the development-to-implementation gap in clinical artificial intelligence, *Nat Med*. 27 (2021) 186-187.
- [71] VASEY, B., et al., Reporting guideline for the early-stage clinical evaluation of decision support systems driven by artificial intelligence: DECIDE-AI, *Nat Med*. 28 (2022) 924-933.
- [72] EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices, amending Directive 2001/83/EC, Regulation (EC) No 178/2002 and Regulation (EC) No 1223/2009 and repealing Council Directives 90/385/EEC and 93/42/EEC, (2017).
- [73] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ЕВРОПЕЙСКАЯ КОМИССИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [74] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for the Certification of Clinically Qualified Medical Physicists, Training Course Series No. 71, Vienna (2021).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГК	гарантия качества
ГО	глубокое обучение
ИИ	искусственный интеллект
КМД	компьютерная медицинская диагностика
КО	критический орган
ЛТ	лучевая терапия
ЛТВК	лучевая терапия с визуальным контролем
ЛТМИ	лучевая терапия с модуляцией интенсивности
ЛТМРВ	лучевая терапия с магнитно-резонансной визуализацией
МО	машинное обучение
МФ	медицинская физика
МФКК	медицинский физик клинической квалификации
НПК	непрерывное повышение квалификации
РТМО	ротационная терапия с модуляцией объема излучения
СНС	сверточная нейронная сеть

СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Avanzo, M.	Авианский референтный онкологический центр, Авиано, Италия
Carrara, M.	Международное агентство по атомной энергии
Ciraj-Bjelac, O.	Международное агентство по атомной энергии
Doshi-Velez, F.	Гарвардский университет, Кембридж (Массачусетс), США
Gershan, V.	Международное агентство по атомной энергии
Heijmen, B.	Медицинский центр и Университет им. Эразма Роттердамского, Роттердам, Нидерланды
Jiang, S.	Юго-западный медицинский центр Техасского университета, Даллас (Техас), США
Nguyen, D.	Юго-западный медицинский центр Техасского университета, Даллас (Техас), США
Seuntjens, J.	Медицинский центр Университета Макгилла, Монреаль, Канада
Titovich, E.	Международное агентство по атомной энергии
Xing, L.	Стэнфордский университет, Стэнфорд (Калифорния), США
van der Merwe, D.	Международное агентство по атомной энергии
Zwanenburg, A.	Национальный центр опухолевых заболеваний (NCT/UCC), Дрезден, и «Онкорэй» — Национальный центр радиационных исследований в онкологии, Дрезден, Германия

МАГАТЭ выражает признательность Андре Деккеру (Нидерланды), Мэриэллен Л. Гайгер (США), Бенджамину Хайбе-Кайнсу (Бельгия) и Вэю Чжао (Китай) за ценные замечания и предложения.

Совещания консультантов

Вена, 19, 23, 24, 26 августа и 2 сентября 2021 года



МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ВЕНА