



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1151>

Оценка перспектив использования технологий искусственного интеллекта для анализа КТ-изображений органов грудной клетки с целью выявления признаков злокачественных новообразований в легких

© Пилюс П.С.^{1*}, Дрокин И.С.¹, Баженова Д.А.^{1, 2},
Маковская Л.А.^{1, 2}, Синицын В.Е.^{1, 2}

¹ ООО «Интеллоджик», 121205 Москва, Сколково, Большой Бульвар 42/1, Российская Федерация

² Медицинский научно-образовательный центр ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; 119192 Москва, Ломоносовский проспект, 27, к. 10, Российская Федерация

³ ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр «Лечебно-реабилитационный центр» Минздрава России; 125367 Москва, Ивановское шоссе, д. 3, Российская Федерация

Цель исследования: проанализировать возможность применения технологий искусственного интеллекта в качестве системы поддержки принятия решения врачей-рентгенологов для выявления узлов в легких при КТ органов грудной клетки в обычное время и в условиях пандемии COVID-19 на примере системы Botkin.AI.

Материал и методы. Были выделены две группы исследований компьютерных томограмм органов грудной клетки: выполненные до (1-я группа) и во время пандемии COVID-19 (2-я группа). Каждая группа содержала анонимизированные данные КТ-исследований 150 пациентов. При исследовании компьютерных томограмм органов грудной клетки 2-й группы были выбраны те, на которых объем изменений, вызванных коронавирусом SARS-CoV2, не превышал 25%. Исследования были проанализированы системой искусственного интеллекта Botkin.AI на предмет наличия периферических легочных узлов размером более 6 мм с последующей «слепой» проверкой результатов анализа тремя врачами-рентгенологами.

Результаты. В 1-й группе чувствительность метода составила 1,0, специфичность – 0,88 и AUC – 0,94, во 2-й группе – 0,93, 0,81 и 0,86 соответственно.

Во 2-й группе небольшое снижение специфичности связано преимущественно с увеличением ложноположительных результатов в виде множественных уплотнений легкого, как проявления коронавирусного поражения легких, принятых моделью искусственного интеллекта за легочные узлы.

Заключение. Платформа обладает высокой точностью обнаружения легочных узлов на компьютерных томограммах органов грудной клетки как в исследованиях, проведенных до, так и во время пандемии COVID-19. Ее использование может быть полезным для предотвращения возможных пропусков важных находок в условиях повышенной нагрузки на врачей-рентгенологов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, компьютерная томография, рак легкого, COVID-19

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Пилюс П.С., Дрокин И.С., Баженова Д.А., Маковская Л.А., Синицын В.Е. Оценка перспектив использования технологий искусственного интеллекта для анализа КТ-изображений органов грудной клетки с целью выявления признаков злокачественных новообразований в легких. *Медицинская визуализация*. 2023; 27 (2): 138–146. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1151>

Поступила в редакцию: 06.03.2022.

Принята к печати: 22.03.2023.

Опубликована online: 15.05.2023.



Evaluation of the prospects for using artificial intelligence technologies to analyze CT scans of the chest organs in order to identify signs of malignant neoplasms in the lungs

© Polina S. Pilius^{1*}, Ivan S. Drokin¹, Daria A. Bazhenova^{1, 2},
Lyudmila A. Makovskaya^{1, 2}, Valentin E. Sinitsyn^{1, 2}

¹ ООО "Intellogic"; 42/1, Bol'shoy Bul'var, Skolkovo, Moscow 143026, Russian Federation

² Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University; 27-10, Lomonosovsky prospekt, Moscow 119192, Russian Federation

³ National Medical Research Treatment and Rehabilitation Center of the Ministry of Health of Russia; 3, Ivankovskoye shosse, Moscow 125367, Russian Federation

The purpose of the study. To analyze the possibility of using artificial intelligence as a decision support system for radiologists for pulmonary nodules detection on Chest CT before and during the COVID-19 pandemic on the example of the system Botkin.AI.

Materials and methods. Two groups of Chest CT studies were identified: those performed before (group 1) and during the COVID-19 pandemic (group 2). Each group contains anonymized CT data of 150 patients. Chest CT scans for group 2 were selected based on the percentage of coronavirus lung damage from 0 to 25%. The research was analyzed by the artificial intelligence system Botkin. AI for the presence of peripheral pulmonary nodes up to 6 mm, followed by a "blind" check of the analysis results by three radiologists.

Results. In group 1, the sensitivity of the method was 1.0; specificity – 0.88 and AUC – 0.94. In the 2nd group 0.93; 0.81 and 0.86, respectively.

In group 2, a slight decrease in specificity is mainly associated with an increase in false positive results in the pulmonary opacities, as manifestations of coronavirus lung damage, taken by the AI model for pulmonary nodes.

Conclusion. The platform has a high accuracy of detecting pulmonary nodules on computed tomography of the chest both in studies conducted before and during the COVID-19 pandemic. It can be useful to prevent possible omissions of important findings in conditions of increased workload for radiologists.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, computed tomography, lung cancer, COVID-19

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Pilius P.S., Drokin I.S., Bazhenova D.A., Makovskaya L.A., Sinitsyn V.E. Evaluation of the prospects for using artificial intelligence technologies to analyze CT scans of the chest organs in order to identify signs of malignant neoplasms in the lungs. *Medical Visualization*. 2023; 27 (2): 138–146.
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1151>

Received: 06.03.2022.

Accepted for publication: 22.03.2023.

Published online: 15.05.2023.

Введение

Узловые образования в легких могут быть проявлением рака легкого, вторичных изменений в легких и других неопухолевых заболеваний [1]. Своевременная диагностика и правильная интерпретация изменений являются важной диагностической задачей.

Рак легкого занимает 1-е место среди мужчин и женщин как в России, так и в мире по заболеваемости и смертности [2–4]. При этом его выявляемость на ранних стадиях составляет всего 29,1% по данным издания "Состояние онкологической помощи населению России в 2019 году" [3]. Поэтому внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) для помощи в обнаружении узлов

в легких, подозрительных на злокачественные новообразования (ЗНО), являлось актуальной задачей еще до начала пандемии COVID-19 [5].

Во время пандемии COVID-19 существенно возросла нагрузка на систему здравоохранения. Многие рентгенологи перешли на интерпретацию КТ-изображений легких, даже при минимальном опыте описания КТ-исследований [6]. Меньше времени заложено на расшифровку снимков в связи с приростом исследований, основной целью врачей-рентгенологов является быстрое описание объема и характера коронавирусного поражения в легких. Количество выполненных компьютерных томограмм органов грудной клетки (ОГК) значительно возросло, в том числе у пациентов



с отсутствием или с минимальными изменениями в легких благодаря тому, что изначально КТ ОГК позиционировалась как один из основных диагностических методов для коронавирусной инфекции и многие, даже бессимптомные пациенты без назначений лечащего врача имели возможность выполнять КТ-исследования. Накопленные с начала 2020 г. массивы данных представляют интерес для дополнительного скрининга заболеваний, не связанных с коронавирусной инфекцией.

На сегодняшний день скрининг рака легкого проводится среди пациентов с факторами риска (курение, профессиональные вредности, возраст старше 50 лет) [7]. Однако у молодых и некурящих людей также возможно развитие данного заболевания, что преимущественно связано с мутациями генов рецептора эпидермального фактора роста (EGFR) и киназы апластической лимфомы [8]. А по данным T.E. Strand и соавт., в течение последних десятилетий имеется тенденция к повышению частоты встречаемости рака легкого у молодых людей [9]. По данным, приведенным в European Journal of Radiology (2021), у пациентов, которым было выполнено исследование компьютерных томограмм ОГК с целью оценки коронавирусной пневмонии, в 12% случаев были впервые обнаружены узлы в легких, подозрительные на ЗНО и требующие дообследования [10]. Поэтому проведение дополнительного анализа компьютерных то-

мограмм легких у пациентов без онкоанамнеза во время пандемии COVID-19 может являться уникальной возможностью для скрининга рака легкого в определенных группах населения без дополнительной лучевой нагрузки.

Цель исследования

Проанализировать возможность применения технологий ИИ для снижения вероятности пропуска врачами-рентгенологами периферических узлов в легких на компьютерных томограммах ОГК, выполненных в обычное время (1-я группа) и в условиях пандемии COVID-19 (2-я группа) на примере системы Botkin.AI.

Материал и методы

Набор данных КТ-исследований

Для данного эксперимента ни на одном из этапов анализа не использовалась персональная и клиническая информация по пациентам, все персональные данные в исследованиях были предварительно удалены. Среди исследований имелись компьютерные томограммы, выполненные по стандартному и по низкодозовому протоколу.

Для оценки качества моделей были собраны и размечены два набора данных, в каждом из которых имеется по 150 исследований компьютерных томограмм ОГК (табл. 1).

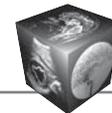
Таблица 1. Описание датасетов для анализа результатов моделей ИИ

Table 1. Description of datasets for analyzing the results of AI models

Параметр датасета Parameters	Датасет I Dataset I	Датасет II Dataset II
Количество исследований Amount of studies	150	150
Дата проведения КТ-исследований Date of studies	2018–2019 гг. (до начала пандемии COVID-19) 2018–2019 гг. (before the COVID-19 pandemic)	2020–2021 гг. 2020–2021 гг.
Источник КТ-исследований Source of CT studies	Центральный архив медицинских изображений Ямало-Ненецкого автономного округа* Central archive of medical images of the Yamal-Nenets Autonomous District*	Медицинские организации Нижнего Новгорода и Санкт-Петербурга* Medical organizations of Nizhny Novgorod and St. Petersburg*
Аппарат для проведения исследования CT Scanner Manufacturers and Models	Siemens Somatom Emotion (16), GE Medical Systems Optima CT660 (64) Siemens Somatom Emotion (16), GE Medical Systems Optima CT660 (64)	Toshiba Aquilion Prime (80), Siemens Somatom Scope (16), GE Healthcare BrightSpeed (16), Toshiba Aquilion Prime (80), Siemens Somatom Scope (16), GE Healthcare BrightSpeed (16)

* Сотрудничество проходило в рамках реализации пилотных проектов.

The cooperation took place within the framework of the implementation of pilot projects.



Описание использования моделей искусственного интеллекта

Для анализа моделями ИИ использовалась одна серия из исследования. Выбор подходящей серии производился автоматически по заданным параметрам. Время обработки одной серии составляло 2–5 мин (в среднем 3,5 мин). Толщина срезов серии для анализа не превышала 1,5 мм. Оценка проводилась в сериях с легочным фильтром на аксиальных срезах.

Для анализа использовались две модели ИИ одинаковой архитектуры, обученные на двух наборах данных: 2500 исследований без признаков COVID-19 (все исследования собраны до 2019 г.) и 3000 исследований, дополнительно содержащих исследования с признаками COVID-19 (дополнительные 500 исследований к 2500 первого дата-сета). Описание архитектуры и методики обучения моделей приведено в работах [11, 12].

Критерии верификации легочных узлов [1]

Решение о наличии или отсутствии узлов в легких принималось на основании анализа изображений тремя врачами-рентгенологами – два рентгенолога с опытом работы в КТ-кабинете до 3 лет и один рентгенолог – 5 лет. Два врача независимо друг от друга фиксировали результаты своей оценки снимков в таблице, третий, более опытный врач, имея доступ к результатам вышеупомянутых врачей, пересматривал исследования и принимал окончательное решение.

Результаты гистологической верификации узлов в исследованиях предоставлены не были.

Перед началом анализа результатов модели ИИ был разработан единый протокол оценки узловых изменений в легких.

Врачами-рентгенологами оценивались узлы в легких размерами от 6 до 35 мм в эффективном диаметре (“эффективный” диаметр – половина суммы двух наибольших линейных размеров узла, перпендикулярных друг другу [13]). Узлы диаметром менее 6 мм не оценивались, поскольку они имеют невысокий риск злокачественности [1, 14]. Также оценивалось количество исследований с наличием узлов размерами более 6 мм.

В 1-й группе пациентов оценивались узлы, которые имели солидный или субсолидный (частично или полностью) характер, во 2-й группе – исключительно солидные узлы. Субсолидные очаги и узлы по типу “матового стекла” в этом случае расценивались как ложноположительные срабатывания системы. Также в обеих группах за истинно положительный результат принималось

детектирование внутрилегочных лимфатических узлов, поскольку модель ИИ не дифференцирует их от остальных солидных узлов. Тотальные кальцификаты в легких считались за ложноположительный результат, однако если кальцификация солидного узла была частичной, то эти узлы также принимались во внимание как истинно положительные, поскольку у них сохраняется риск злокачественности. Если на границе или внутри узла имелась полость, но при этом отчетливо прослеживался мягкотканый компонент – такие изменения были отнесены к истинно положительным. Исследования с внутрилегочными узлами с жировыми включениями в структуре ни в одной из выборок не были обнаружены.

Критерии исключения исследований

Признаки, по которым исследования были исключены из анализа:

- 1) “неисчисляемое” количество легочных узлов;
- 2) микронодулярные изменения в легких: локализованные – по типу “дерева в почках” и диффузные – милиарный паттерн;
- 3) наличие выраженной сочетанной патологии легких или плевры, затрудняющих интерпретацию изображений;
- 4) наличие выраженных артефактов на изображениях, затрудняющих их интерпретацию;
- 5) для 2-й группы были исключены исследования с поражением легких более 25%.

Методология оценки результатов модели искусственного интеллекта

Результаты модели ИИ врачи оценивали во встроенной облачной программе для просмотра BotkinViewer с базовым набором инструментов для визуализации (рис. 1). Каждый узел помечен красным цветом (полупрозрачная заливка области интереса) на всех срезах, где модель обнаружила узел. При необходимости цветовая разметка скрывалась для детальной оценки узлов. Врачи оценивали факт наличия разметки каждого узла в легких по отдельности. Для каждого узла в исследовании системой также рассчитывается объем каждого узла в мм³ и категория по шкале Lung-RADS v.1.1 (по типу узла и его объему) [14]. Однако в рамках данного исследования правильность обозначения объема узлов и категории по шкале Lung-RADS врачами-рентгенологами не оценивалась, в первую очередь, в связи с длительностью референсных расчетов волюметрических показателей врачами-рентгенологами. Оценка соответствия контуров разметки истинным границам узлов также не проводилась.



Рис. 1. Результаты анализа искусственного интеллекта в просмотрщике BotkinViewer. На изображении слева в легочном окне показан субплевральный мягкотканый узел правого легкого, выявленный системой искусственного интеллекта и обозначенный красной разметкой. На правом изображении – тот же срез со скрытой цветовой разметкой.

Fig. 1. The results of the analysis of artificial intelligence in the Botkin.AI Viewer. The left image in the lung window shows the subpleural soft tissue nodule of the right lung, identified by the artificial intelligence system and marked with red markup. On the right image is the same slice with hidden color markup.

Результаты

Характеристики обнаруженных узлов

Был проведен анализ количества узлов, выявленных врачами-рентгенологами и моделью ИИ (табл. 2).

Характеристика ложноположительных результатов

Наиболее частые ложные результаты модели ИИ в 1-й группе: участки пневмофиброза, а также кальцинаты; во 2-й группе – инфильтративные изменения, вероятнее всего, ассоциированные с воспалительным процессом.

Статистический анализ

Статистический анализ проводился в библиотеке scikit-learn для python [15].

Подсчитаны следующие метрики качества модели ИИ для каждой группы датасетов: чувствительность, специфичность и площадь под ROC-кривой (AUC) (рис. 2). Допустимое пороговое значение по каждой из этих метрик для проведения клинической валидации – 0,81, согласно требованиям “Клинических испытаний программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий” [16]. Результаты и этапы анализа исследований 1-й группы (выполненных до пандемии

Таблица 2. Количество выявленных легочных узлов врачами-рентгенологами и моделью ИИ

Table 2. The number of identified lung nodes by radiologists and the AI model

	По данным визуальной оценки рентгенологом According to the visual assessment by radiologists		По данным анализа ИИ According to AI analysis	
	1-я группа group 1	2-я группа group 2	1-я группа group 1	2-я группа group 2
Общее количество исследований в группе Total number of all nodules	150	150	150	150
Количество исследований с наличием легочных узлов 3–6 мм Number of 3–6 mm size nodules	35 (23%)	38 (25%)	28 (18%)	17 (11%)
Количество исследований с наличием легочных узлов 6–35 мм Number of 6–35 mm size nodules	39 (26%)	40 (26%)	39 (26%)	38 (25%)

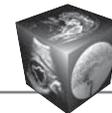
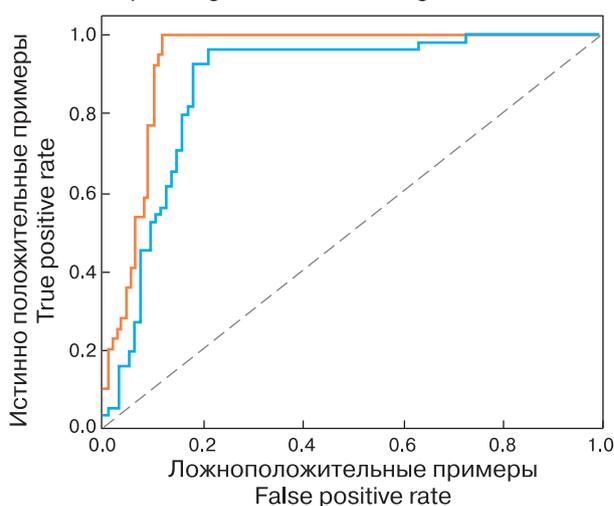


График зависимости чувствительности от частоты ложноположительных заключений
Receiver operating characteristic lung nodule detection



— До пандемии (area = 0.94)
Before pandemic
— Во время пандемии (area = 0.88)
During pandemic

Рис. 2. Соотношение показателей ROC-кривых для исследований: 1-я группа – оранжевая линия, 2-я группа синяя линия.

Fig. 2. Ratio of indicators of ROC curves for studies: group 1 – orange line, group 2 – blue line.

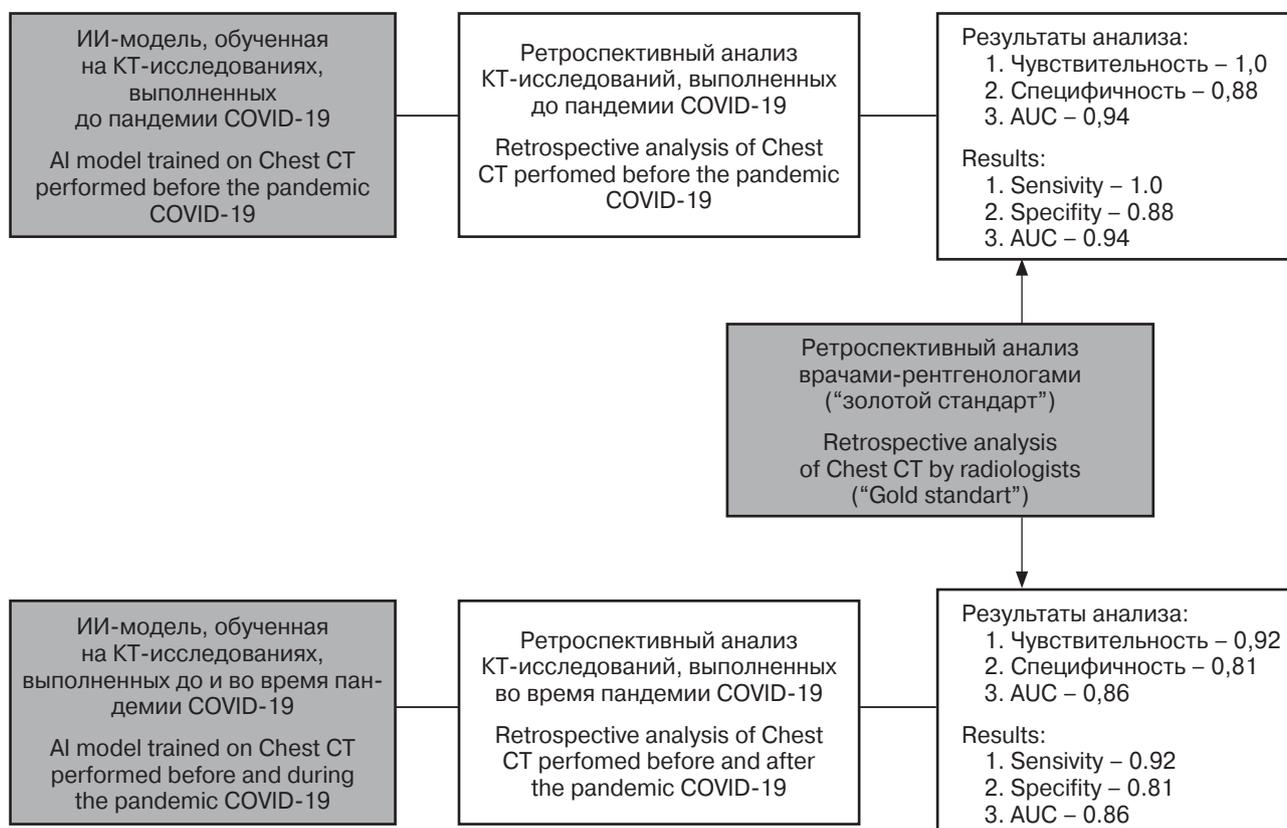


Схема. Схема оценки и результаты анализа КТ-исследований органов грудной клетки, выполненных до и во время пандемии COVID-19.

Scheme. Evaluation scheme and results of analysis of Chest CT studies performed before and during the COVID-19 pandemic.



COVID-19) и 2-й группы (выполненных во время пандемии COVID-19) приведены на схеме.

Обсуждение

Система Botkin.AI имеет метрики качества, которые находятся в диапазоне лучших мировых аналогов, что подтверждает сравнительный анализ результатов тестирования на крупнейшем общедоступном референсном наборе данных для оценки алгоритмов для обнаружения узлов в легких на компьютерных томограммах – LIDC-IDRI (The Lung Image Database Consortium and Image Database Resource Initiative), подготовленного экспертами Североамериканского общества радиологов (RSNA) [17, 18]. Например, на том же наборе данных у автора P. Wu и соавт. алгоритм глубокого обучения при сегментации легочных узлов имеет чувствительность 97,7%, специфичность 98,35%, а у другого автора G.S. Tran и соавт. описываются аналогичные статистические показатели как 96,0 и 97,3% соответственно (цит. по [17]).

Как можно видеть из результатов, полученных в основной статье, метрики качества, которые демонстрируют модели ИИ, зависят от состава данных в наборах, которые используются для тестирования. В исследованиях, выполненных во время пандемии, возрастает вероятность ложноположительных результатов в связи с появлением множественных дополнительных участков уплотнения, порой имеющих схожие характеристики с легочными узлами. Для снижения влияния состава данных на итоговые результаты и повышения универсальности алгоритмов требуется их обучение на качественных и “больших” данных, включающих в себя различные вариации и соотношения патологических изменений [19].

Использование сложных нейросетей для обучения моделей ИИ позволяет улучшить свойства привычных САД-систем за счет того, что в результате проводится ассоциативный анализ входящих данных и фиксируются наборы признаков, по которым модели самостоятельно определяют патологию, даже если ничего похожего не встречалось в обучающей выборке. Это позволяет снизить долю как ложноположительных, так и ложноотрицательных результатов [19].

Следует отметить, что, помимо задач обнаружения и сегментации патологических изменений в легких и их классификации на “узловые” и “неузловые”, в мире постепенно растет количество разработок, позволяющих проводить классификацию выявленных узлов на “доброкачественные” и “злокачественные” изменения. На сегодняшний день наиболее высокие показатели для такой задачи продемонстрировал I. Ali с точностью 90,91%,

чувствительностью 91,37% и AUC 94,14% на наборе данных LUNGx. Однако при развитии данного направления требования к данным для обучения являются более высокими, что замедляет процесс накопления необходимой информации для машинного обучения (цит. по [17]).

Ограничения исследования

1. Количество исследований с узловой патологией выше среднего популяционного.

2. Не использовались исследования со значением поражения в легких более 25%, что может повлиять на результаты при дополнительном исследовании.

3. Сохраняется риск, что очаги по типу консолидации и “матового стекла” могут иметь злокачественный характер [20, 21].

4. Не оценивались узлы менее 6 мм (по общему диаметру).

5. Для данного эксперимента ни на одном из этапов анализа не использовалась клиническая информация по пациентам, а также нет верифицированных данных, у какого количества пациентов узлы в легких имеют злокачественную природу.

Ограничения модели искусственного интеллекта Botkin.AI:

1. Модель не дифференцирует злокачественные изменения от доброкачественных.

2. Модель не предназначена для оценки других изменений органов грудной клетки, подозрительных на злокачественный процесс.

3. Интеграция в контур медицинского учреждения и тестирование платформы занимают время.

4. Из-за анонимизации данных пациентов сложнее сопоставлять и оценивать динамику исследований.

5. Поскольку модель пока не способна дифференцировать лимфатические узлы, жировые образования и т.д., ложноположительные срабатывания неизбежны, однако это вопрос времени.

Заключение

Учитывая достаточно высокие показатели чувствительности и специфичности модели ИИ при анализе компьютерных томограмм ОГК на предмет наличия узлов, подозрительных на ЗНО, возможно ее использование в качестве системы поддержки принятия решения врачом-рентгенологом в рутинной практике, что позволит минимизировать возможность пропуска патологии и снизить влияние человеческого фактора на результат анализа. Также система может быть полезна для повторного пересмотра уже проанализированных врачами данных, в особенности, если известны



условия, при которых повышается вероятность врачебной ошибки, как, например, исследования, выполненные в период пандемии COVID-19.

Наличие ложноположительных и ложноотрицательных результатов делает обязательным условием пересмотр результатов ИИ врачом.

Дальнейшее обучение модели должно быть направлено, в первую очередь, на предотвращение пропуска легочных узлов, требующих дообследования. Также рекомендовано продолжать работу над снижением количества ложных срабатываний, в особенности связанных с наличием воспалительных изменений в легких.

Дополнительная информация

Источник финансирования: Грант на реализацию инновационного проекта “Программная платформа для диагностики и оценки рисков заболеваний с использованием технологий искусственного интеллекта”, соглашение № Г07/20 от 19.06.2020 г.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Благодарности: Авторы выносят благодарность техническому писателю компании Botkin.AI Марии Илларионовой за помощь в оформлении статьи по требованиям журнала “Медицинская визуализация”.

Участие авторов

Пилиус П.С. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, сбор и обработка данных, обзор публикаций по теме статьи, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне, подготовка, создание опубликованной работы, ответственность за целостность всех частей статьи.

Дрокин И.С. – концепция и дизайн исследования, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне.

Баженова Д.А. – проведение исследования, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне.

Маковская Л.А. – проведение исследования, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне.

Синицын В.Е. – утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Pilius P.S. – concept and design of the study, conducting research, collection and analysis of data, review of publications, writing text, text preparation and editing, participation in scientific design, preparation and creation of the published work, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Drokin I.S. – concept and design of the study, , statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, participation in scientific design.

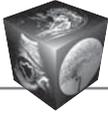
Bazhenova D.A. – conducting research, collection and analysis of data, text preparation and editing, participation in scientific design.

Makovskaya L.A. – conducting research, collection and analysis of data, text preparation and editing, participation in scientific design.

Sinitsyn V.E. – approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. MacMahon H., Naidich D.P., Goo J.M. et al. Guidelines for Management of Incidental Pulmonary Nodules Detected on CT Images: From the Fleischner Society 2017. *Radiology*. 2017; 284 (1): 228–243. <http://doi.org/10.1148/radiol.2017161659>
2. Каприн А.Д., Старинский В.В., Петрова Г.В. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2019. 250 с. ISBN 978-5-85502-251-3
3. Каприн А.Д., Старинский В.В. Malignant neoplasms in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Moscow: MNIОI im. P.A. Herzen, 2019. 250 p. ISBN 978-5-85502-251-3 (In Russian)
4. Каприн А.Д., Старинский В.В. Состояние онкологической помощи населению России в 2019 году. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2020. 239 с. ISBN 978-5-85502-255-1
5. Каприн А.Д., Старинский В.В. The state of oncological care for the population of Russia in 2019. Moscow: MNIОI im. P.A. Herzen, 2020. 239 p. ISBN 978-5-85502-255-1 (In Russian)
6. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer J. Clin.* 2021; 71 (3): 209–249. <http://doi.org/10.3322/caac.21660>
7. Bruno M.A., Walker E.A., Abujudeh H.H. Understanding and Confronting Our Mistakes: The Epidemiology of Error in Radiology and Strategies for Error Reduction. *Radiographics*. 2015; 35 (6): 1668–1676. <http://doi.org/10.1148/rg.2015150023>
8. Shi J., Giess C.S., Martin T. et al. Radiology Workload Changes During the COVID-19 Pandemic: Implications for Staff Redeployment. *Academ. Radiol.* 2021; 28 (1): 1–7. <http://doi.org/10.1016/j.acra.2020.09.008>
9. Pinsky P.F. Lung cancer screening with low-dose CT: a world-wide view. *Translational Lung Cancer Research*. 2018; 7 (3): 234–242. <http://doi.org/10.21037/tlcr.2018.05.12>
10. Liu B., Quan X., Xu C. et al. Lung cancer in young adults aged 35 years or younger: A full-scale analysis and review. *J. Cancer*. 2019; 10 (15): 3553–3559. <http://doi.org/10.7150/jca.27490>
11. Strand T.E., Malayeri C., Eskonsipo P.K. et al. Adolescent smoking and trends in lung cancer incidence among young adults in Norway 1954–1998. *Cancer Causes Control*. 2004; 15 (1): 27–33. <http://doi.org/10.1023/b:caco.0000016575.31651.b0>



10. Kilsdonk I.D., de Roos M.P., Bresser P. et al. Frequency and spectrum of incidental findings when using chest CT as a primary triage tool for COVID-19. *Eur. J. Radiol. Open.* 2021; 8: 100366. <http://doi.org/10.1016/j.ejro.2021.100366>
11. Drokin I., Elicheva E. End-to-End Lung Nodule Detection Framework with Model-Based Feature Projection Block. *Machine Learning Med. Imaging.* 2021; 12966: 91–100. http://doi.org/10.1007/978-3-030-87589-3_10
12. Drokin I., Elicheva E. Deep Learning on Point Clouds for False Positive Reduction at Nodule Detection in Chest CT Scans. *Lecture Notes Comput. Sci.* 2021; 12602: 201–215. http://doi.org/10.1007/978-3-030-72610-2_15
13. Bankier A., MacMahon H., Goo J. et al. Recommendations for Measuring Pulmonary Nodules at CT: A Statement from the Fleischner Society. *Radiology.* 2017; 285 (2): 584–600. <http://doi.org/10.1148/radiol.2017162894>
14. Kazerooni E., Aberle D.R., Black W.C. Lung-RADS v1.1 Assessment Categories. American College of Radiology. 2019.
15. Pedregosa F., Gaël V., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *J. Mach. Learning Res.* 12 (85): 2825–2830, 2011.
16. Морозов С.П., Владимирский А.В., Кляшторный В.Г. Клинические испытания программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий (по специализации “Лучевая диагностика”). М., 2019.
17. Li R., Xiao C., Huang Y. et al. Deep Learning Applications in Computed Tomography Images for Pulmonary Nodule Detection and Diagnosis: A Review. *Diagnostics (Basel).* 2022; 12 (2): 298. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020298>
18. Setio A.A.A., Traverso A., de Bel T. et al. Validation, comparison, and combination of algorithms for automatic detection of pulmonary nodules in computed tomography images: The LUNA16 challenge. *Med. Image Anal.* 2017; 42: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.06.015>
19. Kooi T., Litjens G., van Ginneken B. et al. Large scale deep learning for computer aided detection of mammographic lesions. *Med. Image Analysis.* 2017; 35: 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.07.007>
20. Zhang Y., Yang W., Dong Liu et al. COVID-19 and early-stage lung cancer both featuring ground-glass opacities: a propensity score-matched study. *Translat. Lung Cancer Res.* 2020; 9 (4): 1516–1527. <https://doi.org/10.21037/tlcr-20-892>
21. Perdigón Martinelli C., Morell C., González C., Nova-Lozano C. Metastatic pulmonary dissemination as differential diagnosis of COVID-19 disease. *BMJ Case Rep.* 2020; 13 (10): e237453. <https://doi.org/10.1136/bcr-2020-237453>

Для корреспонденции*: Пилюс Полина Сергеевна – 197022 Санкт-Петербург, ул. Академика Попова, 23. Тел.: +7-926-70-32-10. E-mail: pilius.polina@botkin.ai

Пилюс Полина Сергеевна – врач-рентгенолог, руководитель группы медицинской экспертизы ООО “Интеллоджик” (Botkin.AI), Москва. <https://orcid.org/0000-0001-7802-2734>

Дрокин Иван Сергеевич – директор по исследованиям и разработкам ООО “Интеллоджик” (Botkin.AI), Москва. <https://orcid.org/0000-0003-2634-7857>

Баженова Дарья Анатольевна – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики Медицинского научно-образовательного центра МГУ имени М.В. Ломоносова; медицинский консультант компании ООО “Интеллоджик” (Botkin.AI), Москва. <https://orcid.org/0000-0002-7757-6273>

Маковская Людмила Андрияновна – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики ФГАУ “Лечебно-реабилитационный центр” Минздрава России; медицинский консультант компании ООО “Интеллоджик” (Botkin.AI), Москва. <https://orcid.org/0000-0001-9127-7539>

Синицын Валентин Евгеньевич – доктор мед. наук, профессор, врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики Медицинского научно-образовательного центра МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; руководитель научно-медицинского консультативного совета ООО “Интеллоджик” (Botkin.AI), Москва. <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>

Contact*: Polina S. Pilius – 23, Acad. Popov str., Saint Petersburg 197022, Russian Federation. E-mail: pilius.polina@botkin.ai

Polina S. Pilius – Radiologist, group lead of medical expertise of “Intellogic LLC” (Botkin.AI), Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-7802-2734>

Ivan S. Drokin – Chief research officer of “Intellogic LLC” (Botkin.AI), Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-2634-7857>

Daria A. Bazhenova – Radiologist of Radiology Department of the Lomonosov Moscow State University Medical Research and Educational center; medical consultant of “Intellogic LLC” (Botkin.AI) company, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-7757-6273>

Lyudmila A. Makovskaya – Radiologist of Radiology Department of National Medical Research Treatment and Rehabilitation Center of the Ministry of Health of Russia; medical consultant of “Intellogic LLC” (Botkin.AI) company, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-9127-7539>

Valentin E. Sinitsyn – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Radiologist of Radiology Department of the Lomonosov Moscow State University Medical Research and Educational center; Head of the Scientific and Medical Advisory Board of “Intellogic LLC” (Botkin.AI) company Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>