

Настенко Є. А.^{1,2}, д-р біол. наук, канд. техн. наук, професор, головний науковий співробітник відділу інформаційних технологій та математичного моделювання фізіологічних процесів, професор кафедри біомедичної кібернетики, <https://orcid.org/0000-0002-1076-9337>

Гончарук М. О.², аспірант кафедри біомедичної кібернетики, <https://orcid.org/0000-0003-1537-4198>

Бабенко В. О.², аспірант кафедри біомедичної кібернетики, <https://orcid.org/0000-0002-8433-3878>

Линник М. І.³, д-р мед. наук, завідувач відділу епідеміологічних та організаційних проблем фізіопульмонології, <https://orcid.org/0000-0002-0011-7482>

Ігнат'єва В. І.³, канд. мед. наук, старший науковий співробітник відділення діагностики, терапії і клінічної фармакології захворювань легень, <https://orcid.org/0000-0003-0604-4349>

Ячник В. А.³, канд. мед. наук, учений секретар, <https://orcid.org/0000-0003-0424-1947>

¹ДУ «Національний інститут серцево-судинної хірургії імені М. М. Амосова НАМН України», м. Київ, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

³ДУ «Національний науковий центр фізіатрії, пульмонології та алергології імені Ф. Г. Яновського НАМН України», м. Київ, Україна

Розробка програм на основі штучного інтелекту для діагностики міокардиту при COVID-19 за даними комп'ютерної томографії грудної клітки

Резюме

Вступ. Пацієнти (7,2 %), госпіталізовані з коронавірусною хворобою (COVID-19), мають прояви серцевих захворювань, з них у 23 % діагностують серцеву недостатність. Наразі бракує даних про використання комп'ютерної томографії (КТ) грудної клітки для діагностики міокардиту, пов'язаного із захворюванням на COVID-19.

Мета – обґрунтувати можливість та розробити класифікаційні моделі для діагностики міокардиту в пацієнтів з COVID-19 на основі обробки даних комп'ютерної томографії грудної клітки.

Матеріали та методи. Проведено ретроспективний аналіз даних 140 пацієнтів, хворих на COVID-19. Комп'ютерну томографію органів грудної клітки аналізували за допомогою програмного забезпечення Dragonfly, з дозволу компанії Object Research Systems. Для побудови класифікаційних моделей використано базу даних COVID-CT-MD, яка включає дані КТ 169 підтверджених випадків інфікування SARS-CoV-2. Зонами інтересу були фрагменти КТ зображень серця. Для створення діагностичних моделей були використані методи текстурного аналізу.

Результати. Зазначено, що стандартні методи виявляють міокардит лише у 7,1 % випадків. Показано, що середня щільність міокарда пацієнта з підтвердженим діагнозом SARS-CoV-2 за шкалою Хаунсфілда не відрізняється від денситометричних показників здорової людини. Тому увагу дослідження було зосереджено на пошуку структурних змін КТ-зображень з метою їх використання для побудови діагностичних моделей. Застосування різноманітних класифікаційних алгоритмів справляло незначний вплив на точність класифікації, ймовірно, через інформаційний вміст вхідних даних. Проте отримана точність діагностичних моделей є прийнятною та дозволяє використовувати їх для підтримки прийняття медичних рішень щодо діагностики й лікування.

Висновки. За допомогою стандартних методів, у пацієнтів з тяжкою пневмонією, спричиненою коронавірусом, міокардит діагностували у 7,1 % випадків. Дані світового досвіду практично збігаються із даними власних клінічних досліджень. Отримані результати дали змогу оцінити структурні зміни в міокарді, характерні для гострої форми інфекції SARS-CoV-2. Побудовані класифікаційні моделі вказують на те, що специфічні зміни міокарда при гострій формі SARS-CoV-2 можна ідентифікувати за допомогою комп'ютерної томографії. Найвища діагностична точність на тестових вибірках досягала 74 %. Впрова-

дження розроблених діагностичних програм на базі аналізу текстури даних КТ та технологіях штучного інтелекту дозволяє проводити діагностику міокардиту й оцінювати довгострокову ефективність лікування. Створення розроблених діагностичних програм з використанням технологій штучного інтелекту значно спрощує роботу лікарів променевої діагностики та підвищує ефективність діагностики міокардиту у хворих із SARS-CoV-2-інфекцією.

Ключові слова: COVID-19, аналіз медичних зображень, текстурний аналіз, моделювання, штучний інтелект, машинне навчання, ансамблеві методи.

Вступ. На початку глобальної пандемії, спричиненої новим коронавірусом SARS-CoV-2, було поширеним припущення, що хвороба уражує насамперед тканини легень. Згодом було встановлено, що вірус уражує й інші органи та системи. З накопиченням клінічного досвіду стало очевидним, що існує тісний зв'язок між інфекцією SARS-CoV-2 та серцево-судинними захворюваннями, особливо у пацієнтів з наявною супутньою патологією.

Огляд світової статистики показує, що 7,2 % пацієнтів, госпіталізованих з коронавірусною хворобою (COVID-19), мають клінічні прояви ураження серця, причому серцева недостатність становить 23 % випадків. Ураження серця спостерігається незалежно від тяжкості інфекції, загального перебігу захворювання, часу, що минув з моменту встановлення первинного діагнозу, та наявності серцевих симптомів. Дослідники припускають, що запалення серця не залежить від початкової тяжкості захворювання, зберігається після періоду гострих проявів і демонструє мінімальну редукцію та серологічні ознаки під час періоду одужання [1]. Це може свідчити про значніший вплив запалення серця на все більшу кількість людей, що потребує дослідження довгострокових наслідків.

Інфекція SARS-CoV-2, яка насамперед є респіраторним захворюванням, також може призводити до серцево-судинних ускладнень та міокардиту. Потенційні етіопатогенетичні фактори розвитку міокардиту, спричиненого SARS-CoV-2, в умовах триваючої пандемії наразі активно вивчаються. Механізми запального ураження серця у пацієнтів з інфекцією SARS-CoV-2 включають безпосередній вплив самого вірусу [2,3,4,5,6], синдром гіперзапального вивільнення цитокінів [7,8] та порушення регуляції ренін-ангіотензинової системи [9]. Останнє може посилюватися перевантаженням правих відділів серця у пацієнтів з мультифокальною вірусною пневмонією, тромботичним ураженням коронарних судин та ішемією міокарда.

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) серця вважається найефективнішим методом діагностики гострого запалення міокарда. Діагностичні критерії міокардиту на МРТ (Lake Louise Criteria) включають таке:

1) локальне або дифузне підвищення інтенсивності сигналу на T2-зважених зображеннях;

2) підвищене співвідношення інтенсивності сигналу від міокарда та скелетних м'язів у ранній фазі контрастування;

3) наявність принаймні однієї ділянки накопичення контрастної речовини (гадолінію) у відстроченій фазі, що може свідчити про некротичне або фіброзне ураження серцевого м'яза [10].

Виявлення принаймні двох із цих критеріїв у клінічній картині дає змогу встановити діагноз міокардиту. Магнітно-резонансна томографія серця може підтвердити пошкодження міоцитів та/або рубцювання внаслідок запального процесу у випадку, якщо критерій 3 є позитивним. Додаткова інформація, така як дисфункція лівого шлуночка та перикардіальний випіт, може підтвердити діагноз міокардиту.

Одним із показань до невідкладного проведення МРТ є підозра на гострий міокардит. Типові симптоми включають підвищений рівень тропонінів, шлуночкову дисфункцію та важкі аритмії, які не можуть бути пояснені іншими методами діагностики та візуалізації [11]. В умовах пандемії, що триває, Товариство серцево-судинного магнітного резонансу рекомендувало проводити тільки клінічно невідкладні МРТ-сканування [12], а коронарну комп'ютерну ангіографію визначило як основний метод для виключення супутньої ішемічної хвороби серця. Біопсія ендоміокарда не рекомендується пацієнтам з підозрою на міокардит, спричинений інфекцією SARS-CoV-2, хоча гістологічне дослідження залишається найбільш надійним методом підтвердження діагнозу.

Діагностика міокардиту за допомогою МРТ має низку обмежень. Оцінювання змін базується на суб'єктивній інтерпретації відтінків сірого кольору, а достовірність діагнозу значною мірою залежить від особистого досвіду лікаря. Відсутність каліброваних значень на МРТ-зображеннях становить проблему в розробці стандартизованих критеріїв змін, характерних для міокардиту. На відміну від МРТ, зображення комп'ютерної томографії стандартизовані та відкалібровані. DICOM-файли містять стандартизовані значення щільності для всіх тканин і органів, причому кожна тканина має власну щільність і значення градацій сірого, які чітко відкалібровані. Це дає змогу об'єктивувати і стандартизувати специфічні показники міокардиту. Наразі немає наукових публікацій, які б висвітлювали використання комп'ютерної томографії

грудної клітки для діагностики міокардиту у пацієнтів з COVID-19.

Мета – обґрунтувати можливість та розробити класифікаційні моделі для діагностики міокардиту в пацієнтів з COVID-19 на основі обробки даних комп'ютерної томографії грудної клітки.

Матеріали та методи. Для обґрунтування можливості розробки класифікаторів було проведено ретроспективний аналіз даних 140 пацієнтів, які перебували на лікуванні в Національному науковому центрі фтизіатрії, пульмонології та алергології імені Ф. Г. Яновського НАМН України з ускладненою пневмонією, спричиненою SARS-CoV-2. У 10 пацієнтів (7,1 %) діагноз міокардиту було встановлено за допомогою стандартних методів діагностики. Дані комп'ютерної томографії (КТ) грудної клітки аналізували, використовуючи програмне забезпечення Dragonfly, яке безкоштовно надано для некомерційних наукових досліджень компанією Object Research Systems (Монреаль, Канада). Слід зазначити, що цифрову обробку проводили винятково для неконтрастованих даних КТ, оскільки контрастні речовини накопичуються в тканинах і змінюють денситометричні параметри.

Основою для розробки класифікаційних моделей стала база даних COVID-CT-MD [13], яка включає КТ-зображення 169 підтверджених випадків COVID-19 (середній вік $50,8 \pm 16,8$ року, співвідношення чоловіків і жінок приблизно 2 : 1), 120 нормальних результатів (середній вік $43,3 \pm 14,3$ року, співвідношення чоловіків і жінок приблизно 1 : 1) та 76 випадків позалікарняної пневмонії (середній вік $57,8 \pm 21,9$ року, співвідношення чоловіків і жінок приблизно 1 : 1). В ході дослідження використовували набори даних класу норми (здорових осіб) і COVID-19.

Критерії виключення з аналізу включали кардіохірургічні операції в анамнезі та/або серцеву патологію, а також наявність видимих патологічних змін

у структурах серця на КТ-сканах, таких як звапновані бляшки.

Вхідними даними для аналізу були зони інтересу прямокутної форми на аксіальних зрізах серця (рисунок 1). Кров не впливає на отримувані надалі результати.

Для вирішення проблеми аналізу структур КТ-зображень були запропоновані методи аналізу текстур [14]. З матриць суміжності сірого рівня (GLCM, Gray Level Co-occurrence Matrix) у кілька етапів були відібрані пари пікселів, які найкраще характеризують обидва класи. Процедура їх відбору детально описана в роботі [15].

У цьому дослідженні, на додаток до методів класифікації, які раніше використовувалися в роботі [15], таких як випадковий ліс (Random Forest), легкий градієнтний бустинг (LightGBM), екстремальний градієнтний бустинг (XGBoost) та метод опорних векторів (SVM), був також запропонований метод випадкового лісу дерев оптимальної складності (RFOCT), алгоритм якого більш детально описано в роботі [16].

Результати та їх обговорення. Звичайні програми для перегляду DICOM-зображень, що використовуються в практичній медицині (наприклад, Vitrea, EFilm, K-Pacs), дозволяють вимірювати лише середні, мінімальні та максимальні значення щільності досліджуваних тканин і органів.

На рисунку 2 зображено аксіальний зріз КТ органів грудної клітки (ОГК) здорової контрольної особи. Середня щільність міокарда на представленому зрізі становить 44 одиниці Хаунсфілда (HU, Hounsfield Unit) мінімальна – 21 HU, максимальна – 62 HU, що є типовими значеннями для міокарда.

На рисунку 3 представлено аксіальний зріз КТ пацієнта з підтвердженим діагнозом SARS-CoV-2-інфекції з ознаками міокардиту на основі стандартних методів дослідження. Як видно з рисунку 3, середня щільність

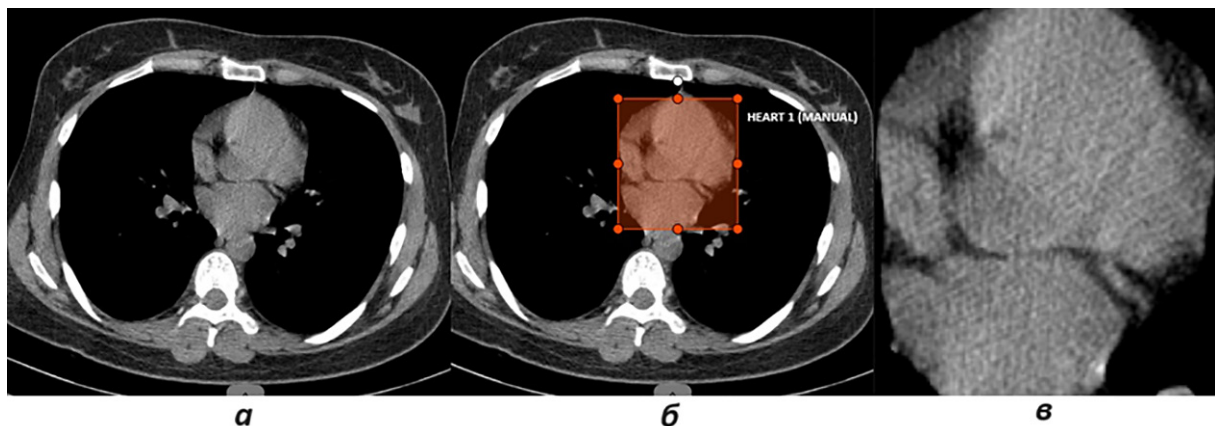


Рисунок 1. Приклад маркованого КТ зрізу: вхідне зображення (а); зона інтересу прямокутної форми (б); вихідне зображення (в)

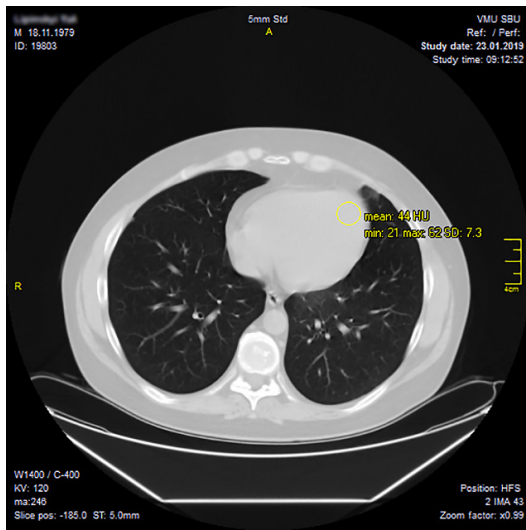


Рисунок 2. Аксіальний зріз КТ ОГК здорової людини з денситометричними показниками міокарда

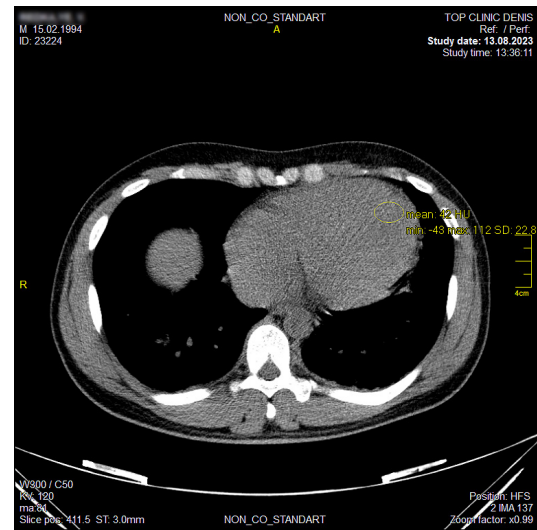


Рисунок 3. Аксіальний зріз КТ пацієнта P. з денситометричними показниками міокардиту, встановленого на основі стандартних методів дослідження

міокарда за шкалою Хаунсфілда становить 42 HU, мінімальна – -43 HU, а максимальна – +112 HU, що, по суті, не відрізняється від денситометричних показників здорової людини. Це свідчить про те, що денситометричні дослідження є неефективним методом діагностики міокардиту. Тому на наступних етапах дослідження увагу було зосереджено на підходах мікрорентгеноструктурного аналізу та розрахунками показників для побудови діагностичних моделей методами текстурного аналізу [14].

Подальший аналіз КТ-сканів проводили за допомогою програми Dragonfly, яка була безкоштовно надана для некомерційних наукових досліджень компанією Object Research Systems (Монреаль, Канада). Програма дозволяє проводити сегментацію, математичну та статистичну обробку зображень, а також будувати стандартні та сегментовані гістограми. Для полегшення використання програми DICOM файли КТ конвертуються в широко використовувані растрові формати (TIFF, JPEG і RAW), що підвищує ефективність обробки. Подальший аналіз зрізів базується на градаціях сірого кольору, отриманих з пікселів зображення, а не з вокселів DICOM-файлу. Аналіз у відтінках сірого корелює з одиницями Хаунсфілда. На рисунках 4 і 5 показано гістограми сегментації одних і тих самих пацієнтів. Як показано на цих рисунках, спостерігається помітна диспропорція як у щільності міокарда, так і у відсотковому розподілі щільності в досліджуваній ділянці міокарда, що надає значної впевненості в діагнозі міокардиту у пацієнта. На рисунках 6 і 7 показано сегментарні гістограми пацієнта С. у гострій фазі пневмонії, спричиненої SARS-CoV-2, коли діагноз міокардиту було встановлено на основі стандартних методів, та че-

рез 6 місяців після встановлення діагнозу й лікування. Сегментаційна гістограма відповідає типовій гістограмі міокардиту.

З представлених рисунків видно відсутність динаміки гістограм, що свідчить про неефективність проведених лікувальних заходів.

Таким чином, цифрова обробка даних КТ ОГК дає змогу не тільки неінвазивно діагностувати міокардит, а й оцінювати ефективність лікування.

Результати побудови діагностичних моделей. Як зазначалося раніше, як вхідні дані були використані

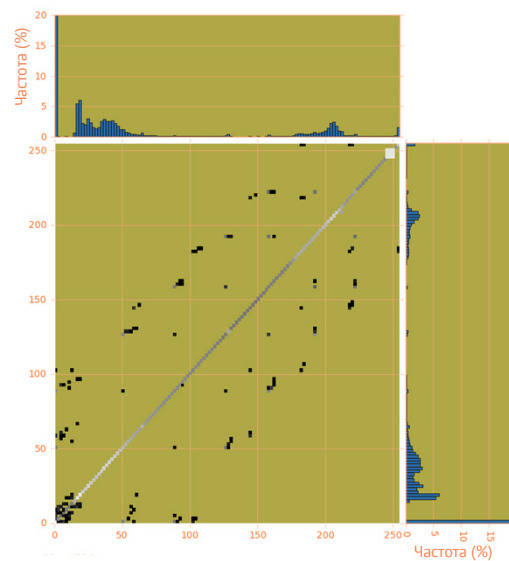


Рисунок 4. Сегментаційна гістограма ділянки міокарда здорової людини

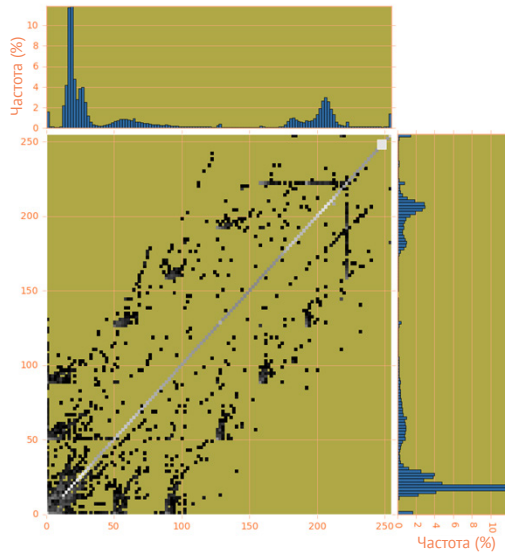


Рисунок 5. Сегментаційна гістограма ділянки міокарда з COVID-19 та міокардитом

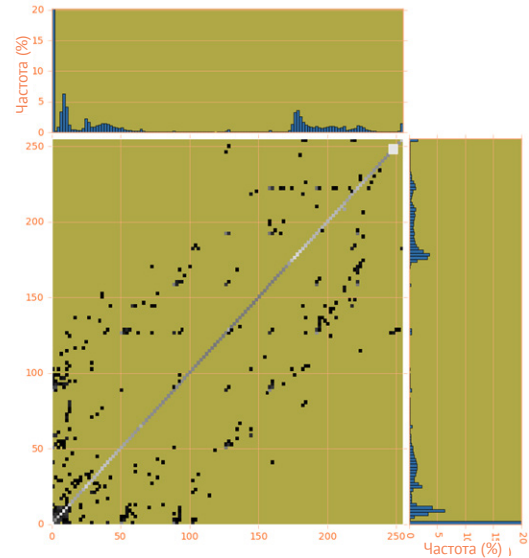


Рисунок 6. Сегментаційна гістограма ділянки міокарда пацієнта з міокардитом від 23.12.2021 року

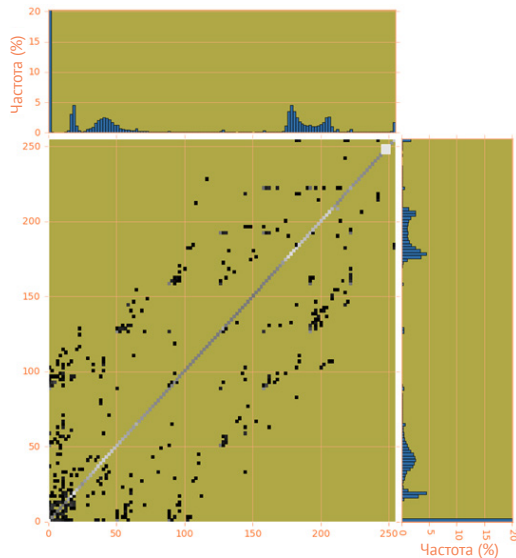


Рисунок 7. Сегментаційна гістограма ділянки міокарда того самого пацієнта з міокардитом через 6 місяців (04.05.2022)

особливості текстурного аналізу (GLCM) зон інтересу (див. рисунок 1). На початковому етапі побудови діагностичних моделей проведено кілька експериментів з попередньою обробкою зображень та балансуванням розмірів вибірок для забезпечення їх однорідності (див. рисунок 1, таблиця 1). Були протестовані такі методи:

- використання вихідних зон інтересу без балансування класів;
- застосування порогової сегментації на зонах інтересу без балансування класів;

- застосування порогової сегментації на зонах інтересу зі збалансуванням вибірок шляхом виключення певної частини спостережень переважачого класу.

Таким чином, порогова сегментація дала змогу створити маски серця і виключити фрагменти легеневої тканини. Велика кількість спостережень дозволила збалансувати класи, тим самим підвищивши якість класифікаційних моделей.

Результати моделей класифікації (таблиці 2, 3, 4) демонструють, що якість розпізнавання двох досліджуваних станів (серце без COVID-19 та серце з гострим COVID-19) є обмеженою.

Таблиця 1

Характеристика сформованих вибірок

Дані	Навчальна вибірка (70 %)	Тестова вибірка (30 %)
Вибірка № 1. Зони інтересу прямокутної форми		
Норма	1201	540
Патологія (COVID-19)	3060	1302
Усього	4261	1842
Вибірка № 2. Порогова сегментація без балансування		
Норма	1201	540
Патологія (COVID-19)	3060	1302
Усього	4261	1842
Вибірка № 3. Порогова сегментація збалансована		
Норма	1201	540
Патологія (COVID-19)	1461	619
Усього	2662	1159

Таблиця 2

Результат класифікації на вибірці № 1

Міри	Алгоритми класифікації				
	Random Forest	XGBoost	LightGBM	SVM	RFOCT
Тренувальна вибірка (70 %)					
Точність	1,000	1,000	1,000	0,757	0,715
Влучність	1,000	1,000	1,000	0,752	0,884
Чутливість	1,000	1,000	1,000	0,987	0,694
F1-міра	1,000	1,000	1,000	0,854	0,778
Тестова вибірка (30 %)					
Точність	0,685	0,682	0,697	0,710	0,560
Влучність	0,581	0,587	0,607	0,623	0,785
Чутливість	0,552	0,563	0,575	0,528	0,519
F1-міра	0,548	0,564	0,576	0,490	0,625

Таблиця 3

Результат класифікації на вибірці № 2

Міри	Алгоритми класифікації				
	Random Forest	XGBoost	LightGBM	SVM	RFOCT
Тренувальна вибірка (70 %)					
Точність	1,000	1,000	0,999	0,740	0,713
Влучність	1,000	1,000	0,999	0,735	0,827
Чутливість	1,000	1,000	1,000	0,994	0,755
F1-міра	1,000	1,000	0,999	0,845	0,790
Тестова вибірка (30 %)					
Точність	0,730	0,713	0,715	0,740	0,682
Влучність	0,651	0,606	0,609	0,798	0,782
Чутливість	0,556	0,554	0,552	0,540	0,775
F1-міра	0,543	0,548	0,544	0,500	0,779

Таблиця 4

Результат класифікації на вибірці № 3

Міри	Алгоритми класифікації				
	Random Forest	XGBoost	LightGBM	SVM	RFOCT
Тренувальна вибірка (70 %)					
Точність	1,000	1,000	1,000	0,648	0,735
Влучність	1,000	1,000	1,000	0,631	0,706
Чутливість	1,000	1,000	1,000	0,868	0,884
F1-міра	1,000	1,000	1,000	0,730	0,785
Тестова вибірка (30 %)					
Точність	0,645	0,610	0,624	0,681	0,656
Влучність	0,644	0,607	0,621	0,701	0,653
Чутливість	0,638	0,606	0,619	0,667	0,756
F1-міра	0,638	0,606	0,619	0,661	0,702

Широкий віковий діапазон пацієнтів дозволяє припустити, що навіть за відсутності інформації про захворювання серця або відповідних кардіологічних ознак, будова серця в осіб старшої вікової групи (віком

50 років і більше) може суттєво відрізнятися від такої в молодших вікових групах.

Встановлено, що використання різноманітних класифікаційних алгоритмів справляє незначний вплив

на результати класифікації, ймовірно, через інформаційний вміст вхідних даних. Тому найкраще тут зосередити увагу на формуванні інформативних ознак.

Однак застосування алгоритмів класифікації дає змогу ідентифікувати зміни в структурах серця на основі результатів КТ, проведених під час гострої фази захворювання.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виявлення змін у структурі серця, пов'язаних з феноменом «лонг-ковіду» [17], який визначається як персистенція симптомів, пов'язаних з інфекцією SARS-CoV-2 протягом щонайменше 3 місяців після гострої фази.

Особливий інтерес буде становити порівняння структурних змін у серці під час гострої фази інфекції SARS-CoV-2 і в разі довготривалого перебігу захворювання.

Висновки

1. За допомогою стандартних методів, у пацієнтів з тяжкою пневмонією, спричиненою коронавірусом, міокардит діагностували у 7,1 % випадків. Дані світового досвіду практично збігаються із даними власних клінічних досліджень.
2. Отримані результати дозволили оцінити структурні зміни в міокарді, характерні для гострої форми інфекції SARS-CoV-2. Побудовані класифікаційні моделі вказують на те, що специфічні зміни міокарда при гострій формі SARS-CoV-2-інфекції можуть бути виявлені за допомогою КТ. На тестових вибірках найкраща досягнута точність діагностики становила 74 %.
3. Використання розроблених діагностичних програм на основі текстурного аналізу даних КТ грудної клітки та технологій штучного інтелекту дає змогу проводити неінвазивну діагностику міокардиту та оцінювати ефективність лікування в динаміці.
4. Створення діагностичних програм з використанням технологій штучного інтелекту значно полегшує роботу променевих діагностів та підвищує рівень діагностики міокардиту в пацієнтів з COVID-19.

Список використаних джерел

References

1. Puntmann VO, Carerj ML, Wieters I, Fahim M, Arendt C, Hoffmann J, et al. Outcomes of Cardiovascular Magnetic Resonance Imaging in Patients Recently Recovered From Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *JAMA Cardiol.* 2020;5(11):1265-1273. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2020.3557>
2. Zheng YY, Ma YT, Zhang JY, Xie X. COVID-19 and the cardiovascular system. *Nat Rev Cardiol.* 2020;17(5):259-260. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-0360-5>
3. Imazio M, Klingel K, Kindermann I, Brucato A, De Rosa FG, Adler Y, et al. COVID-19 pandemic and troponin: indirect myocardial injury, myocardial inflammation or

myocarditis? *Heart.* 2020;106(15):1127-1131. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2020-317186>

4. Babapoor-Farrokhran S, Gill D, Walker J, Rasekhi RT, Bozorgnia B, Amanullah A. Myocardial injury and COVID-19: Possible mechanisms. *Life Sci.* 2020;253:117723. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.117723>
5. Tavazzi G, Pellegrini C, Maurelli M, Belliato M, Sciutti F, Bottazzi A, et al. Myocardial localization of coronavirus in COVID-19 cardiogenic shock. *Eur J Heart Fail.* 2020;22(5):911-915. <https://doi.org/10.1002/ejhf.1828>
6. Xu Z, Shi L, Wang Y, Zhang J, Huang L, Zhang C, et al. Pathological findings of COVID-19 associated with acute respiratory distress syndrome. *Lancet Respir Med.* 2020;8(4):420-422. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30076-X](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30076-X)
7. Huang C, Wang Y, Li X, Ren L, Zhao J, Hu Y, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *Lancet.* 2020;395(10223):497-506. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)30183-5)
8. Ruan Q, Yang K, Wang W, Jiang L, Song J. Clinical predictors of mortality due to COVID-19 based on an analysis of data of 150 patients from Wuhan, China. *Intensive Care Med.* 2020;46(5):846-848. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-05991-x>
9. Liu PP, Blet A, Smyth D, Li H. The Science Underlying COVID-19: Implications for the Cardiovascular System. *Circulation.* 2020;142(1):68-78. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.120.047549>
10. Ferreira VM, Schulz-Menger J, Holmvang G, Kramer CM, Carbone I, Sechtem U, et al. Cardiovascular Magnetic Resonance in Nonischemic Myocardial Inflammation: Expert Recommendations. *J Am Coll Cardiol.* 2018;72(24):3158-3176. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.09.072>
11. Driggin E, Madhavan MV, Bikdeli B, Chuich T, Laracy J, Biondi-Zoccai G, et al. Cardiovascular Considerations for Patients, Health Care Workers, and Health Systems During the COVID-19 Pandemic. *J Am Coll Cardiol.* 2020;75(18):2352-2371. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.03.031>
12. Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. SCMR'S COVID-19 Preparedness Toolkit. SCMR;2024 [cited 2024 Jul 31]. Available from: <https://scmr.org/page/COVID19>
13. Afshar P, Heidarian S, Enshaei N, Naderkhani F, Rafiee MJ, Oikonomou A, et al. COVID-CT-MD, COVID-19 computed tomography scan dataset applicable in machine learning and deep learning. *Sci Data.* 2021;8(1):121. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00900-3>
14. Haralick RM, Shanmugam K, Dinstein I. Textural Features for Image Classification. *IEEE Trans Syst Man Cybern.* 1973;SMC-3(6):610-621. <https://doi.org/10.1109/tsmc.1973.4309314>
15. Honcharuk M, Nasteneko I, Linnik M. [The effectiveness of the use of computed tomography and modern information technologies in detecting structural changes of the heart in the acute form of COVID-19]. *Biomedical Engineering and Technology.* 2024;(14):47-53. <https://doi.org/10.20535/2617-8974.2024.14.304054>
16. Babenko V, Nasteneko I, Pavlov V, Horodetska O, Dykan I, Tarasiuk B, et al. Classification of Pathologies

on Medical Images Using the Algorithm of Random Forest of Optimal-Complexity Trees. *Cybern Syst Anal.* 2023;59:346-358. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00569-z>

17. Svitailo VS, Chemych MD, Saienko OS. [Long-covid and associated injuries of the cardiovascular and nervous systems]. *Infectious Diseases.* 2022;(4):49-54. Ukrainian. <https://doi.org/10.11603/1681-2727.2022.4.13701>

Development of Artificial Intelligence-Based Programs for the Diagnosis of Myocarditis in COVID-19 Using Chest Computed Tomography Data

Ievgen A. Nastenکو^{1,2}, Maksym O. Honcharuk², Vitalii O. Babenko², Mykola I. Lynnyk³, Viktoria I. Ignatieva³, Vitalii A. Yachnyk³

¹National Amosov Institute of Cardiovascular Surgery of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

³Yanovskyi National Scientific Center of Phthisiatry, Pulmonology and Allergology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract

Introduction. It has been established that 7.2% of patients hospitalized with coronavirus disease (COVID-19) exhibit signs of heart disease, with 23% of these patients experiencing heart failure. Currently, there is a lack of data on chest computed tomography (CT) for diagnosing myocarditis associated with COVID-19.

The aim. To justify the feasibility and develop classification models for diagnosing myocarditis in COVID-19 patients based on chest CT data processing.

Materials and methods. A retrospective analysis of data from 140 COVID-19 patients was conducted. Chest CT scans were analyzed using DRAGONFLY software, with permission from Object Research Systems. The COVID-CT-MD database, which includes CT data from 169 confirmed cases of SARS-CoV-2 infection, was used to build classification models. The regions of interest were fragments of heart CT images. Texture analysis methods were employed to create diagnostic models.

Results. It was shown that the average density of the myocardium of a patient with a confirmed diagnosis of SARS-CoV-2 infection according to the Hounsfield scale does not essentially differ from the densitometric indicators of a healthy person. Therefore, the research was focused on finding structural changes in CT images for their use in constructing diagnostic models.

The use of different classification algorithms had little effect on classification accuracy, probably due to the informational content of the input data. However, the obtained accuracy of the diagnostic models is acceptable and allows them to be used to support medical decision-making regarding diagnosis and treatment.

Conclusions. Using classic methods, myocarditis was diagnosed in 7.1% of patients with severe pneumonia caused by the coronavirus. The global data closely aligns with the results of our clinical studies. The obtained results allowed for assessing structural changes in the myocardium characteristic of the acute form of SARS-CoV-2 infection. The constructed classification models indicate that specific changes in the myocardium during the acute form of SARS-CoV-2 infection can be identified using CT. The highest diagnostic accuracy on test samples reached 74%. The implementation of the developed diagnostic programs based on texture analysis of CT data and artificial intelligence technologies enables the diagnosis of myocarditis and the assessment of long-term treatment efficiency. Creation of these diagnostic programs using artificial intelligence technologies significantly simplifies the work of radiologists and improves the efficiency of myocarditis diagnosis in patients with SARS-CoV-2 infection.

Keywords: COVID-19, medical image analysis, texture analysis, modelling, machine learning, artificial intelligence, ensemble methods.

Стаття надійшла в редакцію / Received: 07.08.2024

Після доопрацювання / Revised: 29.08.2024

Прийнято до друку / Accepted: 16.09.2024