

CZU: 616.24-073.75:004.8

DOI: <https://doi.org/10.52692/1857-0011.2024.2-79.35>

INTELIGENȚA ARTIFICIALĂ ÎN DIAGNOSTICUL RADIOLOGIC AL BOLILOR PULMONARE

Nadejda PISARENCO, dr. în şt. med., conf. univ.

IMSP Spitalul Clinic Municipal de Ftiziopneumologie, Chişinău, Republica Moldova

e-mail: nadejda.pisarenco@gmail.com

Rezumat.

Inteligența artificială (AI) joacă un rol-cheie în diagnosticul radiologic al bolilor pulmonare, îmbunătățind precizia și rapiditatea diagnosticului. Tehnicile de „deep learning”, cum ar fi rețelele neuronale convoluționale (CNN), permit AI să detecteze cele mai mici modificări patologice pe radiografii, adesea inaccesibile prin analiză vizuală. Sisteme precum CheXNet și CAD4TB s-au dovedit a fi eficiente în diagnosticarea pneumoniei, tuberculozei și cancerului pulmonar, ceea ce este deosebit de important în situațiile de screening în masă. Aplicarea inteligenței artificiale reduce povara asupra medicilor și oferă o precizie mai mare a diagnosticului, în special în contextul congestiei sistemului de sănătate și al lipsei de specialiști.

Cuvinte-cheie: inteligență artificială, diagnosticare cu raze X, boli pulmonare, învățare profundă, CAD4TB, acuratețea diagnosticului.

Summary. Artificial Intelligence in Radiological Diagnosis of Lung Diseases

Artificial intelligence (AI) plays a crucial role in the radiological diagnosis of lung diseases, enhancing diagnostic accuracy and speed. Deep learning techniques, such as convolutional neural networks (CNN), enable AI to detect minute pathological changes on X-rays, often beyond visual analysis. Systems like CheXNet and CAD4TB have proven effective in diagnosing pneumonia, tuberculosis, and lung cancer, especially valuable in mass screening scenarios. The use of AI reduces the burden on medical professionals and ensures higher diagnostic accuracy, which is essential in overloaded healthcare systems and areas with limited medical resources.

Keywords: artificial intelligence, radiological diagnosis, lung diseases, deep learning, CAD4TB, diagnostic accuracy.

Резюме. Искусственный интеллект в рентгенодиагностике заболеваний легких

Искусственный интеллект (ИИ) играет ключевую роль в рентгенодиагностике заболеваний легких, повышая точность и скорость диагностики. Методы глубокого обучения, такие как сверточные нейронные сети (CNN), позволяют ИИ обнаруживать мельчайшие патологические изменения на рентгеновских снимках, часто недоступные при визуальном анализе. Системы, такие как CheXNet и CAD4TB, доказали свою эффективность в диагностике пневмонии, туберкулеза и рака легких, что особенно важно в условиях массового скрининга. Применение ИИ снижает нагрузку на врачей и обеспечивает более высокую точность диагностики, особенно в условиях перегруженности здравоохранения и нехватки специалистов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, рентгенодиагностика, заболевания легких, глубокое обучение, CAD4TB, точность диагностики.

Introducere.

Inteligența artificială (AI) joacă un rol important în medicină prin îmbunătățirea analizei datelor, automatizării și suportului decizional clinic. Una dintre cele mai promițătoare aplicații ale IA este diagnosticarea radiologică a bolilor pulmonare. Algoritmii de „deep learning”, cum ar fi rețelele neuronale convoluționale, demonstrează o precizie ridicată, ceea ce îmbunătățește diagnosticarea unor patologii precum tuberculoza, cancerul pulmonar, pneumonia și COVID-19. Acest lucru nu numai că accelerează diagnosticarea, dar îmbunătățește și acuratețea, ceea ce este important într-un sistem de sănătate supraîncărcat și cu deficit de specialiști.

Metodele tradiționale de diagnosticare cu raze X depind de experiența medicilor și sunt predispu-

se la subiectivitate. IA contribuie la minimizarea factorului uman prin accelerarea și standardizarea procesului de diagnosticare [1]. Eficacitatea acestora a fost confirmată în detectarea maselor nodulare și a semnelor timpurii de cancer care pot să nu fie vizibile la analiza vizuală. De exemplu, sistemele de diagnostic asistate de calculator, cum ar fi CAD4TB, facilitează depistarea în masă a tuberculozei, îmbunătățind precizia acestora [7].

IA abordează, de asemenea, deficitul de specialiști, în special în regiunile îndepărtate, și reduce volumul de muncă al medicilor, permițându-le să se concentreze pe cazuri mai complexe. Tehnologii precum COVID-Net oferă viteză și exactitate în analiza imaginilor, ceea ce a fost deosebit de relevant în pandemie [12].

În pofida avantajelor, utilizarea inteligenței artificiale are anumite limitări: acuratețea acesteia depinde de calitatea datelor pe baza cărora este instruită, iar rezultatele pot fi părtinitoare. Considerentele etice sunt, de asemenea, importante, inclusiv aspectele legate de răspunderea pentru erori și protecția datelor pacienților [4].

Scopul acestui studiu este de a analiza în mod cuprinzător utilizarea potențială a IA în diagnosticul radiologic al bolilor pulmonare, cum ar fi tuberculoza, pneumonia, cancerul pulmonar și COVID-19.

Material și metode. Acest studiu utilizează publicații științifice actuale și documente juridice selectate din principalele baze de date, cum ar fi PubMed, Google Scholar și JSTOR. Materialul s-a bazat pe cercetarea pe tema aplicării inteligenței artificiale în diagnosticul radiologic al bolilor pulmonare, automatizarea analizei imaginilor medicale și îmbunătățirea preciziei diagnosticului bolilor respiratorii. Principalele metode au inclus analiza literaturii științifice în funcție de conținut.

Rezultat și discuții

Metode tradiționale de radiodiagnostic al bolilor pulmonare

De-a lungul decadelor, diagnosticul radiologic a rămas una dintre principalele metode de identificare a patologiilor pulmonare, incluzând pneumonia, tuberculoza și cancerul pulmonar. Metodele clasice, îmbunătățite prin integrarea tehnologiilor digitale, sunt utilizate atât în practica clinică de zi cu zi, cât și în programele de screening în masă.

Radiografia digitală asigură vizualizarea rapidă a modificărilor patologice în țesutul pulmonar, cum ar fi nodulii, infiltrațiile și cavitățile. Fluorografia digitală, la rândul său, este utilizată pentru detectarea în masă a tuberculozei în țările cu un nivel ridicat de incidență, inclusiv în Rusia și India, unde joacă un rol esențial în controlul răspândirii acestei infecții [13].

Cu toate acestea, diagnosticul radiologic clasic are anumite limitări. Un dezavantaj este capacitatea limitată de a detecta stadiile incipiente ale anumitor boli, cum ar fi cancerul pulmonar, din cauza dificultății de vizualizare a modificărilor mici. Calitatea diagnosticului poate depinde, de asemenea, de experiența clinicianului, făcând din subiectivitatea interpretării una dintre limite [6]. Deficitul de radiologi calificați, în special în regiunile îndepărtate, crește riscul de erori de diagnostic [1].

Radiografia clasică nu furnizează întotdeauna suficiente date pentru un diagnostic precis, fiind necesare tehnici suplimentare, precum CT sau RMN. Aspectele tehnice joacă, de asemenea, un rol: aparatele cu raze X, deși oferă imagini de înaltă calitate, nu pot înlocui CT și RMN atunci când sunt

necesare imagini de înaltă rezoluție. Expunerea la radiații este, de asemenea, o problemă, în special pentru examinările frecvente.

Pentru a depăși aceste limitări, se dezvoltă în mod activ noi tehnologii, inclusiv utilizarea inteligenței artificiale pentru a automatiza analiza imaginilor cu raze X. Sisteme precum CheXNet și CAD4TB sunt capabile să detecteze cele mai mici modificări în imagini cu o precizie ridicată, ceea ce reduce probabilitatea de a rata stadiile incipiente ale bolii [8].

Inteligența artificială și rolul său în diagnosticarea medicală

Inteligența artificială (AI) este un domeniu al informaticii care se ocupă cu dezvoltarea de sisteme care imită funcțiile intelectuale umane, cum ar fi învățarea, raționamentul, percepția și luarea deciziilor. În medicină, este important să se facă distincția între IA generală și IA limitată. IA generală (sau IA puternică) este un sistem ipotetic capabil să îndeplinească sarcini la nivelul inteligenței umane, dar există încă doar în teorie. IA limitată (IA slabă) se concentrează pe rezolvarea unor sarcini limitate și este deja utilizată în mod activ în medicină. În diagnosticarea radiologică, IA limitată este antrenată pe date mari pentru a îndeplini sarcini precum recunoașterea anomaliilor în imagini, cum ar fi semnele de cancer sau pneumonie, ceea ce o face eficientă pentru analizarea unor cantități uriașe de date la viteză mare.

Automatizarea diagnosticelor medicale a început în anii 1950 și 1960, odată cu crearea unor sisteme expert precum MYCIN, dezvoltat pentru diagnosticarea infecțiilor bacteriene la Universitatea Stanford în anii 1970. MYCIN a analizat simptomele și a recomandat tratamentul folosind reguli, deși nu a fost implementat în practică din cauza puterii de calcul limitate și a neîncrederii față de cadrele medicale [10].

În anii 1980 și 1990, progresele în tehnologia informatică au condus la dezvoltarea unor sisteme bazate pe rețele bayesiene și arbori decizionali. Acestea foloseau abordări probabilistice pentru predicție și luarea deciziilor, dar erau limitate de incapacitatea lor de a se adapta la date noi. Odată cu apariția tehnicilor de învățare automată (ML) și de învățare profundă (DL), a devenit posibilă antrenarea AI pe date medicale reale, identificând modele ascunse.

ML utilizează metode statistice pentru a construi modele care prezic rezultate bazate pe date noi. De exemplu, algoritmi ML pot clasifica imaginile cu raze X prin recunoașterea semnelor unor boli precum tuberculoza sau pneumonia. DL, un subset al ML bazat pe rețele neuronale multistrat, imită performanța creierului uman și este deosebit de eficient pentru

analizarea imaginilor medicale complexe, cum ar fi radiografiile pulmonare [5]. Rețelele neuronale convergente (CNN) sunt coloana vertebrală a multor sisteme moderne de analiză a imaginilor medicale.

IA este deja utilizată pe scară largă în diagnosticare, în special în radiologie. De exemplu, CheXNet a demonstrat o precizie ridicată în diagnosticarea pneumoniei pe baza imaginilor cu raze X, comparabilă cu munca medicilor cu experiență [8]. CAD4TB utilizează inteligența artificială pentru a analiza automat razele X în diagnosticarea tuberculozei, ceea ce este deosebit de util în țările cu o incidență ridicată a bolii [7]. Aceste tehnologii îmbunătățesc acuratețea și rapiditatea diagnosticării, ceea ce este esențial în sistemele de sănătate suprasolicitate.

Utilizarea IA în diagnosticul radiologic al bolilor pulmonare

Utilizarea IA în procesarea radiografiilor prezintă mai multe avantaje semnificative. În primul rând, AI automatizează sarcinile de rutină, cum ar fi analiza imaginilor, ceea ce reduce sarcina medicilor și accelerează stabilirea diagnosticului. Acest lucru este deosebit de important în screeningul de masă, în care patologii trebuie să fie detectate rapid la un număr mare de pacienți.

În al doilea rând, inteligența artificială îmbunătățește precizia diagnosticului. Algoritmii de învățare profundă pot detecta modificări care pot fi omise prin interpretare vizuală. De exemplu, sisteme precum CheXNet detectează semne de pneumonie cu o precizie comparabilă cu cea a radiologilor [8]. Acest lucru este deosebit de important pentru pacienții cu infecții acute, cum ar fi COVID-19.

În cele din urmă, IA contribuie la standardizarea procesului de diagnosticare. Sistemele bazate pe IA funcționează în conformitate cu algoritmi predefiniți, ceea ce reduce variabilitatea interpretării și riscul de eroare umană. Acest lucru este relevant atunci când există o încărcare ridicată a sistemului medical, când sunt posibile erori cauzate de extenuarea medicilor [4].

Aplicarea practică a IA în radiologie: experiență și perspectivă

În prezent, există multe exemple de succes de utilizare a inteligenței artificiale (AI) în practica clinică, în special în diagnosticul radiologic al bolilor pulmonare. Sistemele AI au fost deja implementate în centre medicale din întreaga lume, unde îi ajută pe medici să stabilească rapid și precis diagnosticul diferitelor patologii. Un astfel de exemplu este sistemul CheXNet dezvoltat pentru a diagnostica pneumonia pe baza radiografiilor. CheXNet a fost antrenat pe mai mult de 100 000 de imagini cu raze X și a demonstrat o precizie comparabilă cu cea a radiologilor experimentați [8].

Un alt exemplu important este tehnologia CAD4TB (Computer-Aided Detection for Tuberculosis) utilizată pentru depistarea în masă a tuberculozei. Acest sistem a fost pus în aplicare într-o serie de țări cu o incidență ridicată a tuberculozei și s-a dovedit a fi eficient în medii cu resurse limitate. Tehnologia a fost utilizată în țări precum Bangladesh, India și Zambia, unde infrastructura de sănătate este insuficient de dezvoltată, iar incidența tuberculozei rămâne ridicată. Din 2022, sistemul CAD4TB, în combinație cu sistemul portabil cu raze X FUJIFILM FDR Xair, a fost utilizat și în Moldova, Azerbaidjan și Armenia [1, 3]. CAD4TB analizează automat radiografiile pulmonare, identificând zonele suspecte, ceea ce permite medicilor să diagnosticheze TB mai rapid și mai precis, în special în stadiile incipiente ale bolii. Acest lucru accelerează semnificativ procesul de stabilire a diagnosticului și îmbunătățește acuratețea acestuia, ceea ce este deosebit de important în situațiile de screening în masă [2, 7].

În timpul pandemiei COVID-19, sistemele AI precum COVID-Net și-au demonstrat capacitatea de a se adapta rapid la noile provocări și de a ajuta la diagnosticarea pneumoniei virale. COVID-Net a fost conceput special pentru a analiza radiografiile pacienților COVID-19 și a demonstrat o precizie ridicată în detectarea trăsăturilor caracteristice ale infecției virale [12]. Aceste exemple subliniază rolul important al IA în abordarea provocărilor din domeniul sănătății globale și în îmbunătățirea eficienței diagnosticării.

Aplicarea inteligenței artificiale în contexte clinice reale a arătat o serie de rezultate pozitive, în special în ceea ce privește îmbunătățirea preciziei și a vitezei de diagnosticare. De exemplu, utilizarea CheXNet pentru diagnosticarea pneumoniei a dus la o reducere semnificativă a timpului necesar pentru analiza radiografiilor. În situațiile de depistare în masă, cum ar fi la apogeul pandemiei COVID-19, acest lucru s-a dovedit a fi extrem de util, deoarece sistemul de inteligență artificială a putut procesa rapid imaginile și furniza medicilor rezultate preliminare [8].

Utilizarea sistemului CAD4TB în țările în curs de dezvoltare a condus, de asemenea, la îmbunătățiri semnificative în diagnosticarea TB. Acest sistem poate identifica rapid cazurile suspecte de TB și poate trimite pacienții pentru teste suplimentare, ceea ce accelerează considerabil procesul de diagnosticare în medii cu morbiditate ridicată și resurse limitate [7].

În medii clinice reale, IA ajută medicii să își reducă volumul de muncă prin creșterea eficienței și reducerea riscului de erori de diagnostic, ceea ce este valabil mai ales în medii în care accesul la specialiști calificați este limitat. Cu toate acestea, sistemul

servește doar ca un instrument de sprijin, iar decizia finală aparține întotdeauna medicului.

În plus, sistemele AI precum COVID-Net și-au demonstrat utilitatea în diagnosticarea bolilor virale, în special în medii pandemice în care sunt necesare un răspuns rapid și un diagnostic rapid. Adoptarea rapidă a COVID-Net în practica clinică a contribuit la reducerea sarcinii asupra clinicienilor și la accelerarea procesului de identificare a persoanelor bolnave, ceea ce a jucat un rol important în controlul pandemiei [12].

IA are un impact semnificativ asupra îmbunătățirii preciziei și vitezei diagnosticului în radiologie. Având capacitatea de a analiza cantități mari de date într-un timp scurt, algoritmi de învățare profundă sunt capabili să detecteze cele mai mici modificări în imaginile cu raze X, ceea ce îmbunătățește precizia diagnosticului. De exemplu, algoritmi AI precum CheXNet pot detecta semne timpurii de pneumonie care pot fi omise de medici din cauza subiectivității sau a oboselii [8].

Un aspect important al utilizării IA este capacitatea sa de a reduce timpul de luare a deciziilor. Într-un cadru de screening în masă, cum ar fi diagnosticarea tuberculozei sau COVID-19, AI poate analiza mii de radiografii în câteva minute, oferind medicilor rezultate pe baza cărora să ia decizii cu privire la acțiunile ulterioare. Acest lucru este deosebit de important în situațiile de pandemie, unde viteza de diagnosticare poate afecta în mod direct sănătatea și viața pacienților [12].

IA permite, de asemenea, standardizarea procesului de diagnosticare, ceea ce contribuie la reducerea probabilității de eroare umană. Algoritmi standardizați reduc variabilitatea în interpretarea radiografiilor și îmbunătățesc precizia generală a diagnosticului. Astfel, IA ajută medicii să ia decizii mai bine informate și îmbunătățește rezultatele clinice [9].

Perspectivelor inteligenței artificiale în diagnosticul radiologic

Dezvoltarea IA în radiodiagnostic este corelată cu integrarea sa în practica medicală și cu abordările multidisciplinare. IA va colecta și analiza date din diverse surse, cum ar fi CT, RMN și teste de laborator, permițând medicilor să ia decizii mai precise și să îmbunătățească exhaustivitatea diagnosticului. Un domeniu-cheie de interes este crearea de modele de inteligență artificială explicabile, care vor permite medicilor să înțeleagă modul în care inteligența artificială ia decizii, ceea ce va spori încrederea în tehnologie și va facilita integrarea acesteia în practica clinică [4]. Explicabilitatea va facilita, de asemenea, formarea medicilor, promovând utilizarea eficientă a IA în medicină.

IA pentru regiunile îndepărtate și cu resurse limitate este un obiectiv special. Aparatele cu raze X ultraportabile cu IA vor facilita depistarea și diagnosticarea în masă în medii cu acces limitat la asistență medicală, ceea ce este deosebit de important pentru țările în curs de dezvoltare [7]. IA are potențialul de a automatiza procesele de rutină în radiologie, cum ar fi analiza și raportarea imaginilor, permițând medicilor să se concentreze asupra cazurilor clinice complexe, îmbunătățind calitatea diagnosticului. Sistemele de IA vor fi un ajutor important în accelerarea diagnosticării și soluționarea problemelor complexe de diagnostic.

Tehnologiile cloud vor crea platforme pentru schimbul de date medicale, ceea ce va accelera accesul la informații și va crește viteza de stabilire a diagnosticului. Astfel de platforme vor îmbunătăți calitatea asistenței medicale și vor reduce costul examinărilor repetate. Algoritmi IA vor analiza nu numai datele radiografice, ci și informațiile genetice și clinice, deschizând oportunități pentru tratamentul personalizat al bolilor complexe, cum ar fi cancerul pulmonar.

În viitor, inteligența artificială va deveni parte integrantă a procesului de diagnosticare a bolilor pulmonare, automatizând sarcinile de rutină și eliberând medicii pentru cazurile complexe. Acest lucru va îmbunătăți diagnosticarea și va reduce volumul de muncă al specialiștilor, făcând asistența medicală mai accesibilă și mai eficientă. IA va deveni un instrument-cheie pentru depistarea în masă în cazul pandemiilor și epidemiilor. Sisteme precum COVID-Net și CAD4TB vor fi utilizate în mod activ pentru a detecta rapid afecțiunile și pentru a accelera diagnosticarea, reducând astfel sarcina asupra asistenței medicale și oferind asistență medicală în timp optim [12].

Astfel, IA va îmbunătăți semnificativ precizia, viteza și accesibilitatea diagnosticării bolilor pulmonare în următorii ani.

Concluzii.

Acest studiu arată că inteligența artificială (AI) în diagnosticarea cu raze X a bolilor pulmonare are un potențial semnificativ și demonstrează deja rezultate impresionante. IA automatizează analiza imaginilor cu raze X, accelerează stabilirea diagnosticului, îmbunătățește precizia acestuia și reduce sarcina asupra medicilor. Sisteme precum CheXNet și CAD4TB s-au dovedit eficiente în îmbunătățirea diagnosticării pneumoniei, tuberculozei, cancerului pulmonar și COVID-19.

Integrarea CAD cu aparate portabile cu raze X poate oferi diagnostice de calitate în medii cu resurse limitate, făcând din aceste tehnologii o parte

importantă a strategiei globale de combatere a bolilor pulmonare. IA este deosebit de utilă în cazul lipsei de specialiști și al depistării în masă, îmbunătățind diagnosticul în țările cu resurse limitate. În mod important, IA servește drept instrument de sprijin pentru clinicieni, permițându-le să se concentreze asupra cazurilor complexe.

Studiul subliniază importanța îmbunătățirii explicabilității și a eliminării prejudecăților din algoritmi. Transparența și corectitudinea sunt provocări-cheie pentru integrarea cu succes a IA în medicină. Sunt necesare actualizări periodice ale algoritmilor și adaptarea la contexte clinice specifice pentru a îmbunătăți acuratețea.

Introducerea de programe de formare pentru personalul medical promovează utilizarea eficientă a IA, permițând medicilor să interpreteze corect rezultatele acestora și să fie conștienți de limitele sale. Acest lucru este deosebit de important în situațiile de screening în masă. De asemenea, este necesar să se elaboreze standarde pentru protecția datelor și să se aloce responsabilitatea pentru erorile IA. Legislația, cum ar fi GDPR, ar trebui să ia în considerare particularitățile IA în medicină pentru a proteja viața privată a pacienților.

Perspectivile includ dezvoltarea de abordări multidisciplinare care combină date de la radiografie, tomografie computerizată, teste de laborator și genetică pentru a personaliza diagnosticul. Explicațiile IA vor spori încrederea și vor simplifica adoptarea tehnologiei în medicină, îmbunătățind diagnosticul pentru toți pacienții.

Bibliografie.

1. Ardila, D., et al. End-to-End Lung Cancer Screening with Three-Dimensional Deep Learning on Low-Dose Chest Computed Tomography. *Nature Medicine*, vol. 25, no. 6, 2019, pp. 954-961. DOI: 10.1038/s41591-019-0447-x.
2. CAD for TB: proven. Artificial Intelligence. <https://www.checktb.com/ai-description>
3. Delft Imaging delivered the first CAD4TB software to Moldova. <https://delft.care/moldova/>
4. Doshi-Velez, Finale, and Been Kim. Towards a Rigorous Science of Interpretable Machine Learning. *arXiv preprint*, arXiv:1702.08608, 2017, <https://arxiv.org/abs/1702.08608>.
5. LeCun, Yann, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. Deep Learning. *Nature*, vol. 521, 2015, pp. 436-444. DOI: 10.1038/nature14539.
6. Litjens, Geert, et al. A Survey on Deep Learning in Medical Image Analysis. *Medical Image Analysis*, vol. 42, 2017, pp. 60-88. DOI: 10.1016/j.media.2017.07.005.
7. Melendez, J., et al. Automated Detection of Pulmonary Tuberculosis in Chest Radiographs. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 35, no. 5, 2016, pp. 1160–1171. DOI: 10.1109/TMI.2016.2528120.
8. Rajpurkar, Pranav, et al. CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning. *arXiv preprint*, arXiv:1711.05225, 2017, <https://arxiv.org/abs/1711.05225>.
9. Shah, Preeti, et al. Artificial Intelligence in Medical Imaging: Enhancing Personalized Healthcare. *Radiology*, vol. 297, no. 3, 2020, pp. 487-495. DOI: 10.1148/radiol.2020200171.
10. Shortliffe EH. Mycin: A Knowledge-Based Computer Program Applied to Infectious Diseases. *Proc Annu Symp Comput Appl Med Care*. 1977 Oct 5:66–9. PMID: PMC2464549.
11. TB REP 2.0. Facebook, https://www.facebook.com/@StopTbPartnership/?locale=ru_RU
12. Wang, Linda, et al. COVID-Net: A Tailored Deep Convolutional Neural Network Design for Detection of COVID-19 Cases from Chest X-Ray Images. *arXiv preprint*, arXiv:2003.09871, 2020, <https://arxiv.org/abs/2003.09871>.
13. WHO Global tuberculosis report 2024. Geneva: World Health Organization, 2024. 68 p. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/379339/9789240101531-eng.pdf?sequence=1>