

Опыт использования аддитивных технологий на примере трехмерной реконструкции легких в клинической практике противотуберкулезного диспансера

А.Г.Наумов , А.С.Шпрыков, Э.Р.Крюков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации: 603005, Россия, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10 / 1

Резюме

Целью исследования явилось изучение объема кровопотери и длительность оперативного сеанса у пациентов с деструктивным туберкулезом легких при использовании трехмерных анатомических моделей легких. **Материалы и методы.** В клиническом проспективном исследовании принимали участие пациенты с деструктивным туберкулезом легких ($n = 80$). Все пациенты были распределены на 2 группы: 1-ю (основную) составили больные ($n = 40$), у которых выполнялась предоперационная реконструкция легких (для изучения синтопии здоровой и пораженной ткани (визуальное оценивание) и подготовки к оперативному сеансу (нарезка модели скальпелем) перед операцией торакальные хирурги взаимодействовали с трехмерной анатомической моделью легких); 2-ю (контрольную) группу – больные ($n = 40$), у которых трехмерная предоперационная реконструкция легких не проводилась (торакальные хирурги не взаимодействовали с трехмерной анатомической моделью легких). Результаты в контрольной и основной группе сравнивались с использованием U-критерия Манна–Уитни, коэффициентов корреляции Спирмена и Кендалла. Полученные данные представлены в виде абсолютных и относительных величин, а также в виде боксплотов, отражающих медиану и межквартильный интервал, диаграмм рассеивания с линиями тренда, графиками плотности вероятности. Уровень статистической значимости различий при проверке гипотез выбран при $p < 0,05$. **Результаты.** Показано, что объем кровопотери ($U = 590$; $p = 0,042$) и длительность оперативного вмешательства ($U = 587$; $p = 0,041$) у пациентов основной группы меньше по сравнению с таковыми у больных группы контроля. При использовании критерия Спирмена установлена корреляция средней силы между объемом кровопотери и продолжительностью оперативного вмешательства ($\rho = 0,54$; $p < 0,001$) у больных основной группы. Положительная корреляция наблюдалась также при анализе с использованием критерия Кендалла ($\tau = 0,42$; $p < 0,001$). **Заключение.** Благодаря установленным различиям между пациентами основной и контрольной групп в отношении параметров объема кровопотери и продолжительности оперативного вмешательства при предоперационной подготовке торакальных хирургов с использованием полимерных макетов легких подтвердилась гипотеза о влиянии аддитивных технологий на указанные индикаторы, что свидетельствует о значимости примененного метода реконструкции.

Ключевые слова: туберкулез, реконструкция, легкие, операция, аддитивные технологии.

Конфликт интересов. Конфликт интересов авторами не заявлен.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Этическая экспертиза. Исследование проводилось в соответствии с принципами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации. У всех пациентов, принявших участие в исследовании, получено письменное добровольное информированное согласие.

Для цитирования: Наумов А.Г., Шпрыков А.С., Крюков Э.Р. Опыт использования аддитивных технологий на примере трехмерной реконструкции легких в клинической практике противотуберкулезного диспансера. *Пульмонология*. 2022; 32 (1): 109–117. DOI: 10.18093/0869-0189-2022-32-1-109-117

The experience of using additive technologies for three-dimensional reconstruction of the lungs in the clinical practice of a tuberculosis dispensary

Aleksey G. Naumov , Aleksandr S. Shprykov, Emil' R. Kryukov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Privolzhsky Research Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation: Minina i Pozharskogo pl. 10/1, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Abstract

The aim was to study the volume of blood loss and the duration of a surgical session in patients with destructive pulmonary tuberculosis using three-dimensional anatomical models of the lungs. **Methods.** The study was conducted in 2020 – 2021 in the State Budgetary Healthcare Institution of the Nizhny Novgorod region “Nizhny Novgorod Regional Clinical Tuberculosis Dispensary” as part of an internal grant from the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Privolzhsky Research Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation. The prospective clinical study included 80 patients. All patients were divided into two groups. The main group included 40 patients. Preoperative lung reconstruction was performed for these patients. Thoracic surgeons used the three-dimensional anatomical models of the lungs to study the syntopy of healthy and diseased tissue (visual assessment) and prepare for the surgical session (cutting the model with a scalpel). Three-dimensional preoperative lung reconstruction was not performed for the other 40 patients in the control group. In this group, the thoracic surgeons did not use 3D anatomical models of the lungs. Comparison of the results in the control and the main group was carried out using the Mann – Whitney U-test and Spearman and Kendall correlation tests. The obtained data are described with absolute and relative values, boxplots reflecting median (*Me*) and interquartile interval (*IQI*), scatter plots with trend lines, and probability density plots. The level of statistical significance of differences for testing the hypotheses was chosen at $p < 0.05$. **Results.** It was shown that the volume of blood loss ($U = 590$; $p = 0.042$) and the

duration of surgery ($U = 587$; $p = 0.041$) in patients of the main group are smaller than in patients in the control group. A moderate correlation was established between the volume of blood loss and the duration of the surgical session ($\rho = 0.54$; $p < 0.001$) in the main group using the Spearman's test. Kendall's test also showed a positive correlation ($\tau = 0.42$; $p < 0.001$). **Conclusion.** The established differences between the main group and control group in the volume of blood loss and the duration of surgery due to the inclusion of polymer models of the lungs in preoperative preparation of thoracic surgeons confirm our hypothesis about the effect of additive technologies on the above parameters and indicate the significance of the applied reconstruction method.

Key words: tuberculosis, reconstruction, lungs, surgery, additive technologies.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out at the expense of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Privolzhsky Research Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation.

Ethical review. This study was conducted in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki of the World Medical Association. All patients participating in the study gave their written informed consent.

For citation: Naumov A.G., Shprykov A.S., Kryukov E.R. The experience of using additive technologies for three-dimensional reconstruction of the lungs in the clinical practice of a tuberculosis dispensary. *Pul'monologiya*. 2022; 32 (1): 109–117 (in Russian). DOI: 10.18093/0869-0189-2022-32-1-109-117

Благодаря усилиям противотуберкулезной службы и позитивным изменениям в социально-экономической сфере государства в настоящее время в Российской Федерации отмечается снижение заболеваемости и смертности населения от туберкулеза (ТБ) [1]. Однако на фоне эпидемиологической стабилизации не снижается число пациентов с лекарственно-устойчивыми формами ТБ как среди взрослого контингента [1, 2], так и среди детей [3]. У таких пациентов при низком уровне приверженности приему противотуберкулезных препаратов, стойком сохранении деструктивных изменений в легочной ткани и частой неэффективности терапевтического лечения специфического процесса, особенно с лекарственной устойчивостью возбудителя, требуется проведение оперативных вмешательств по показаниям.

По данным отечественной литературы, потребность в оперативном разрешении ТБ в Российской Федерации крайне высока: в 2013 г. прооперированы > 13 тыс. пациентов (6,2 % от общего числа больных, состоящих на учете в противотуберкулезных диспансерах) [4].

Даже при высокой эффективности выполненного оперативного разрешения деструктивных изменений при ТБ легких в 5–40 % случаев могут наблюдаться обострения и рецидивы специфического процесса, при которых требуется повторное хирургическое лечение [5], что может быть проявлением в т. ч. неправильно подобранной оперативной стратегии из-за отсутствия у врача ясного представления об синтопии (анатомо-топографическом соотношении) пораженной и здоровой ткани в легком.

Повторные радикальные оперативные сеансы ассоциированы с высоким уровнем травматизма, который проявляется в увеличении продолжительности операции, развитии выраженной кровопотери и риска интраоперационных осложнений вплоть до летального исхода [6].

В отечественной [7–12] и зарубежной литературе [13–16] все чаще встречаются публикации, связанные с возможностями применения технологий аддитивного производства в различных отраслях медицины.

Процесс трехмерной печати представлен на рис. 1. Как правило, для воссоздания из цифро-

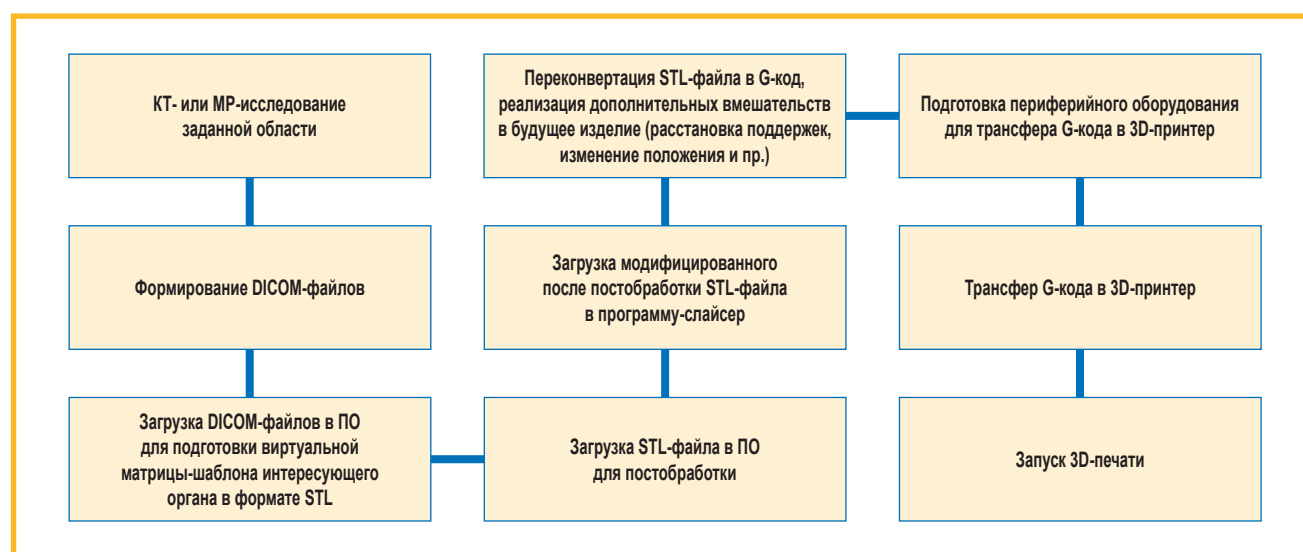


Рис. 1. Процесс изготовления материального объекта при использовании технологии трехмерной печати

Примечание: КТ – компьютерная томография; МР – магнитный резонанс; STL – формат *Stereolithography*; G-код (GCODE) – программный язык печати; DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) – отраслевой медицинский стандарт; ПО – программное обеспечение.

Figure 1. The process of manufacturing a material object using 3D printing technology

вых данных материального объекта (например, органа или органокомплекса) в медицине требуется наличие компонентов отраслевого медицинского стандарта *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)*, представляющего собой совокупность объектных файлов с теговой организацией, которые генерируются и кодируются в процессе проведения, например, компьютерно-томографического (КТ) или магнитно-резонансного исследования. После компиляции DICOM-файлов их можно загрузить в специализированное компьютерное программное обеспечение (ПО), способное подготовить (извлечь) виртуальную матрицу-шаблон будущего материального объекта. По завершении данного этапа специалист выгружает из ПО в персональный компьютер электронный файл 3D-модели органа в широкоиспользуемом формате *Stereolithography (STL)*. Далее эта модель подгружается в другое ПО, в котором оператор может провести цифровую постобработку — удалить артефакты, выделить нужную область, стабилизировать модель, заполнить полые образования или сохранить их и т. д. На последнем этапе работы с ПО специалист загружает 3D-модель в т. н. программу-слайсер, где происходят перекодирование STL-файла в понятный для 3D-принтера программный язык печати — G-код (GCODE), а также техническая коррекция будущего изделия — изменение толщины слоя печати, положения модели, масштаба, интеграция поддержек и пр. Образовавшийся набор команд (G-код) переносится с помощью периферийного устройства (FLASH-накопителя, карты памяти или посредством USB-кабеля) в 3D-принтер и запускается печать.

Благодаря детальной предоперационной оценке соотношения здоровой и патологически измененной легочной ткани использование в клинической практике трехмерной анатомической модели легких, изготовленной с помощью 3D-принтера на основе цифровых данных (DICOM-файлы), полученных при проведении КТ органов грудной клетки (ОГК), позволит торакальному хирургу в процессе операции не только наиболее четко скоординировать свои действия, но и оптимизировать продолжительность оперативного сеанса и уменьшить объем кровопотери.

Целью данного исследования явилось изучение объема кровопотери и продолжительности оперативного сеанса у пациентов с деструктивным ТБ легких при использовании трехмерных анатомических моделей легких.

Материалы и методы

В клиническом проспективном исследовании принимали участие пациенты с деструктивным ТБ легких ($n = 80$: 36 (45 %) женщин, 44 (55 %) мужчины; возраст — 15–59 лет; медиана (Me) возраста — 40 (32,5–53,0) лет). Исследование проводилось в 2020–2021 гг. на базе Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Нижегородской области «Нижегородской областной противотуберкулезный диспансер» в рамках внутреннего гранта Федерального государ-

ственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Критерии включения в исследование:

- возраст больных — 15–60 лет;
- установленный Центральной контрольной врачебной комиссией диагноз ТБ, наличие стойких деструктивных изменений в легочной ткани по данным рентгенологических методов визуализации — КТ ОГК);
- наличие добровольного информированного согласия больных на проведение оперативного вмешательства и трехмерной реконструкции легких.

Критерии исключения из исследования:

- возраст пациентов старше 60 лет;
- отсутствие верифицированного диагноза ТБ;
- отсутствие объективных данных за наличие деструктивного процесса в легких;
- письменный отказ от оперативного вмешательства и трехмерной реконструкции легких.

Все пациенты были распределены на 2 группы:

- 1-ю (основную; $n = 40$) составили больные, у которых выполнялась предоперационная реконструкция легких (для изучения синтопии здоровой и пораженной ткани (визуальная оценка) и подготовки к оперативному сеансу (нарезка модели скальпелем) перед операцией торакальные хирурги взаимодействовали с трехмерной анатомической моделью легких);
- 2-ю (контрольную; $n = 40$) группу составили больные, у которых трехмерная предоперационная реконструкция легких не проводилась (торакальные хирурги не взаимодействовали с трехмерной анатомической моделью легких).

Клинические формы ТБ, наблюдаемые у пациентов обеих групп, представлены в таблице.

Оценка кровопотери по итогам операции осуществлялась гравиметрическим методом (кровь с салфеток, шариков; содержимое банок электроотсоса; миллилитры). Затраченное время на оперативное вмешательство подсчитывалось при сверке анестезио-

Таблица
Клинические формы туберкулеза у пациентов
1-й и 2-й групп; n (%)

Table
Clinical forms of tuberculosis in patients
of the 1st and 2nd groups; n (%)

Форма туберкулеза	1-я группа ($n = 40$)	2-я группа ($n = 40$)
Одиночная / множественные туберкулемы	14 (35)	19 (47,5)
Инфильтративный	13 (32,5)	4 (10)
Фиброзно-кавернозный	4 (10)	5 (12,5)
Диссеминированный	4 (10)	7 (17,5)
Очаговый	4 (10)	4 (10)
Кавернозный	1 (2,5)	—
Цирротический	—	1 (2,5)

логических карт больных (время начала и окончания операции; минуты).

Для проведения трехмерных реконструкций легких использовался специально разработанный протокол (рис. 2) с указанием сведений о дате реконструкции, фамилии, имени, отчестве, возрасте больного, источнике данных о структуре легочной ткани (КТ или магнитно-резонансное исследование) и т.д.

КТ ОГК выполнялись на аппарате *Somatom Emotion 16* (*Siemens Aktiengesellschaft*, Германия). Полученные после выполнения КТ-исследований DICOM-файлы обрабатывались при помощи следующего ПО:

- извлечение виртуальных матриц-шаблонов легких — *Materialise Mimics InPrint 2.0* (*Materialise N.V., Leuven*, Бельгия), коммерческий тип лицензии;
- компьютерная постобработка извлеченных матриц-шаблонов легких — *Autodesk Netfabb 2020.1* (*Autodesk, Inc.*, США), коммерческий тип лицензии;
- перекодирование модели легких из формата STL в G-код и дополнительное редактирование — *Ultimaker Cura 4.8.0* (*Ultimaker B.V., Utrecht*, Нидерланды);
- ПО с открытым исходным кодом по лицензии LGPLv3 (*GNU Lesser General Public License version 3*).

Физические (тактильные) модели легких изготавливались на 3D-принтере *Ultimaker 2+* (*Ultimaker B.V., Utrecht*, Нидерланды) с использованием пластика PLA (*Poly lactide*) и TPU (*Thermoplastic polyurethane*). Данные виды пластика, как и многие другие, поставляются разными производителями в виде многократно намотанной на специальную катушку пластиковой нити (прутка, филамента) диаметром 1,75–2,850 мм. Диаметр филамента составил 2,85 мм из-за конструктивных особенностей 3D-принтера *Ultimaker 2+*. Цвет PLA-пластика — серебристый, TPU — белый. Использовались катушки с пластиком фирмы *Ultimaker B.V.* (Нидерланды).

Модели легких распечатывались не целиком, а частично, до начала инициализации «принтинга», исходя из заранее выбранного КТ-слоя, который фиксировался в ПО *Autodesk Netfabb 2020.1*.

Катушка с полимером просушивалась 1 раз в неделю в течение 1 ч при температуре 60 °C в сушильной станции *Boxman-2* (*Jinhua Wanhao Spare Parts Co., LTD*, Китай), т. к. PLA-пластик обладает высокой гигроскопичностью.

Технические параметры (температура нагревания сопла, температура подогрева столика 3D-принтера и т. д.) процесса печати с использованием указанных видов полимерных прутков задавались по умолчанию, согласно рекомендациям производителя.

Печать с послойным нанесением полимерного материала на столик принтера, тактильных моделей легких осуществлялась в вертикальном положении для PLA-пластика и в горизонтальном — для TPU-пластика. При указанных позициях «выращиваемых» изделий уменьшались риски случайного смещения наплавляемого слоя.

Высота готовых тактильных моделей легких составляла в среднем 70 мм, ширина — 70 мм, глубина —

ГБУЗ НО «Нижегородский областной клинический противотуберкулезный диспансер»
Отделение для больных туберкулезом органов дыхания

Протокол реконструкции легочной ткани

Дата реконструкции: _____

ФИО пациента: _____

Пол: М ☐ Ж ☐

Возраст: _____

Диагноз: _____

Отделение: _____

Источник данных о структуре легочной ткани: _____

Метод извлечения: _____

Оборудование для реконструкции: _____

Материал для реконструкции: _____

Оттиск ФИО пациента, отделения, номера палаты на макете:

да ☐ нет ☐



Цель реконструкции: ☐ оценка приверженности лечению

☐ предоперационный навигационный шаблон

Зона интереса выделена: да ☐ нет ☐

Технические параметры макета: _____

Информированное добровольное согласие на реконструкцию легочной ткани (согласно ФЗ от 21.11.11 № 323 «Об основах охраны здоровья граждан Российской Федерации», статья 20):

Исполнитель

Согласен

Не согласен

Рис. 2. Протокол реконструкции легочной ткани

Figure 2. Protocol for the reconstruction of lung tissue

22 мм. Данные параметры задавались искусственно с целью ускорения процесса производства. С точки зрения авторов, это обстоятельство не оказало влияния на объективность оценки торакальными хирургами синтопии здоровой и пораженной специфическим процессом легочной ткани. Учитывая основные морфометрические характеристики легких взрослого человека по А.И.Абрикосову (1948), масштаб трехмерных анатомических моделей (отдельно взятого

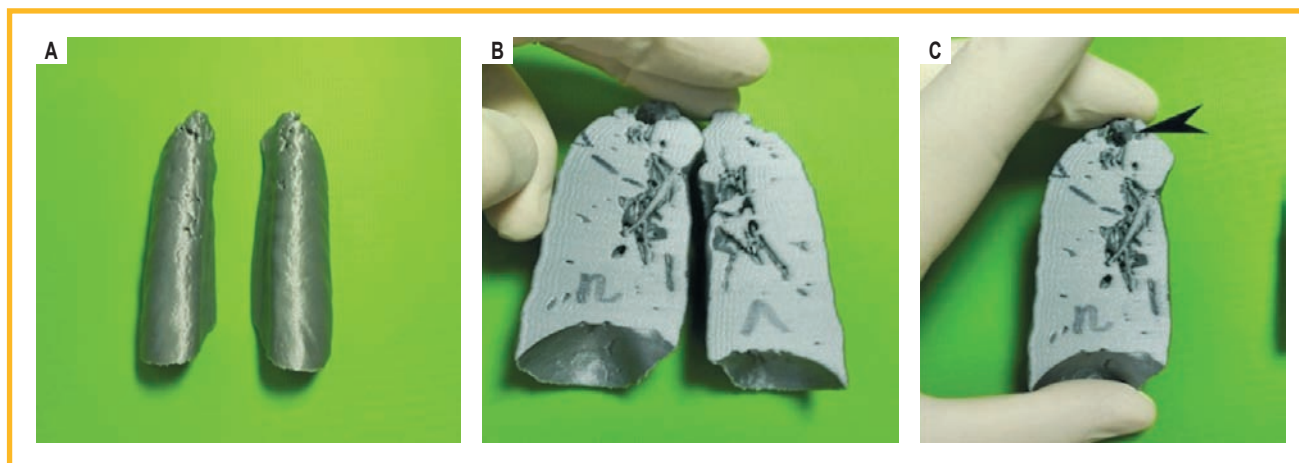


Рис. 3. Пример готовой трехмерной анатомической модели легких больного Г., изготовленной из PLA-пластика: А — общий вид легких (задняя часть); В — общий вид легких с заданным компьютерно-томографическим слоем (передняя часть); С — пораженное правое легкое с заданным компьютерно-томографическим слоем (передняя часть) с пунктирной линией-ориентиром зоны с деструкцией (черная стрелка)

Figure 3. An example of a finished three-dimensional anatomical model of lungs of patient G. made of PLA plastic: A, general view of the lungs (posterior part); B, general view of the lungs with a given computed tomographic layer (anterior part); C, the affected right lung with a given computed tomographic layer (anterior part) with a dotted line as a landmark of the destruction zone (black arrow)

легкого) был представлен следующими усредненными показателями в сравнении с истинными размерами изучаемого органа:

- высота — 1 : 4;
- ширина — 1 : 5;
- глубина или толщина — 1 : 5.

На предоперационных макетах сосуды адекватно дифференцировались исключительно в области корней легких.

PLA-пластик представляет собой алифатический биоразлагаемый полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Он позволяет создавать модели с достаточным уровнем детализации и прочности (рис. 3). Поэтому легочные модели, полученные при его экструзии, использовались для визуального оценивания синтопии здоровой и пораженной легоч-

ных тканей. Для выделения зоны интереса на моделях из PLA-материала применялся спиртсодержащий маркер черного цвета фирмы *Crown Ball Pen Co., Ltd.* (Корея).

TPU-пластик, или термопластичный полиуретан, относится к эластомерам, что определяет возможность, в отличие от PLA, нарезать полученные изделия из данного вида полимера любым острым предметом (рис. 4). TPU-пластик использовался для создания дополнительных моделей легких, наравне с моделями, изготовленными из PLA-пластика, но с возможностью проведения хирургического рассечения. Для выделения зоны интереса на моделях из TPU-материала применялись высокоадгезионные акриловые краски оранжевого цвета (*Tamiya Inc.* Япония). Краска наносилась с помощью кисточки из натуральной щетины.

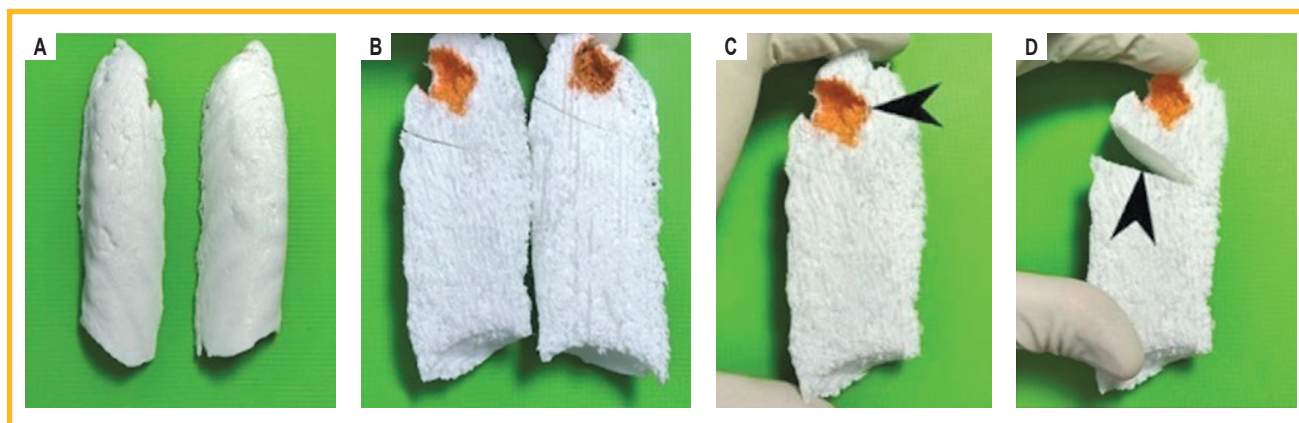


Рис. 4. Пример готовой трехмерной анатомической модели легких больного С., изготовленной из TPU-пластика: А — общий вид легких (задняя часть); В — общий вид легких с заданным компьютерно-томографическим слоем (передняя часть); С — пораженное правое легкое с заданным компьютерно-томографическим слоем (передняя часть) с окрашенной зоной деструкции (черная стрелка); D — отсечение патологической области на модели легкого (черная стрелка)

Figure 4. An example of a finished three-dimensional anatomical model of lungs of patient S. made of TPU plastic: A, general view of the lungs (posterior part); B, general view of the lungs with a given computed tomographic layer (anterior part); C, the affected right lung with a given computed tomographic layer (anterior part) with a colored destruction zone (black arrow); D, cutting off the pathological area on the lung model (black arrow)

Анализ статистических данных осуществлялся с помощью языка программирования R, выпуск 4.1.0, в среде разработки *RStudio* версии 1.4.1103 (*RStudio*, PBC, США) с использованием пакетов *ggplot2*, *ggpubr*, *viridis*, *hrbrthemes*, *gridExtra* на базе операционной системы *Windows 10 Pro 64-bit* (версия 2004, сборка 19041.804) (*Microsoft Corp.*, США). С целью недопущения появления в исследовании ошибки второго рода проводился расчет размера выборки (мощность исследования). Тестирование на определение подчинения исследуемых данных закону нормального распределения проводилось с помощью тестов Колмогорова—Смирнова, Лиллифорса и графика нормальных вероятностей. Для дальнейших расчетов использовались непараметрические методы анализа, т. к. собранные статистические сведения не подчинялись закону нормального (Гауссова) распределения. В исследовании принимали участие пациенты 2 различных групп, поэтому для статистического анализа были подобраны критерии, типичные для независимых выборок. Сравнение результатов в контрольной и основной группах проводилось с использованием U-критерия Манна—Уитни, коэффициента корреляции Спирмена. Для более детального анализа научных материалов на линейность и монотонность в исследование введен вспомогательный коэффициент корреляции Кендалла (τ). Полученные данные представлены в виде абсолютных и относительных величин, а также в виде боксплотов, отражающих *Me* и межквартильный интервал, диаграмм рассеивания с линиями тренда, графиками плотности вероятности. Уровень статистической значимости различий при проверке гипотез выбран при $p < 0,05$.

Результаты

По результатам исследования у пациентов основной группы показаны меньшие объем кровопотери

($U = 590$; $p = 0,042$) и продолжительность оперативного вмешательства по сравнению с таковыми у больных группы контроля ($U = 587$; $p = 0,041$) (рис. 5).

У пациентов обеих групп наблюдалась положительная корреляция между продолжительностью операции и объемом кровопотери (рис. 6А). Одной из дополнительных причин выбора непараметрического критерия и коэффициентов корреляции для анализа стало неравномерное распределение данных со значительной правосторонней асимметрией (см. рис. 6В).

Обсуждение

Трехмерная печать (или аддитивное производство, аддитивные технологии, быстрое прототипирование, технологии изготовления твердых объектов произвольной формы) — это революционный тандем программных, технических инструментов и человеческих ресурсов, позволяющий воссоздать любой орган человеческого тела из различных природных или искусственно созданных материалов (твердые виды пластиков, фотополимеры, порошковые металлы и т. д.) за определенный период [17–19]. Аддитивные технологии являются автоматизированными, высокоиндивидуализированными, гибкими, простыми в использовании, экономичными, но требующими определенных навыков для непосредственной работы с ними [20–22], что препятствует их широкому распространению.

Стоит отметить, что при проведении КТ, которая, без сомнения, является «золотым стандартом» диагностики многих заболеваний ОГК, не всегда возможно четко сформировать единое интегральное изображение всех плоскостей исследования, что может оказать влияние на качество оказываемой хирургической помощи и увеличить риски развития неблагоприятных процессов.

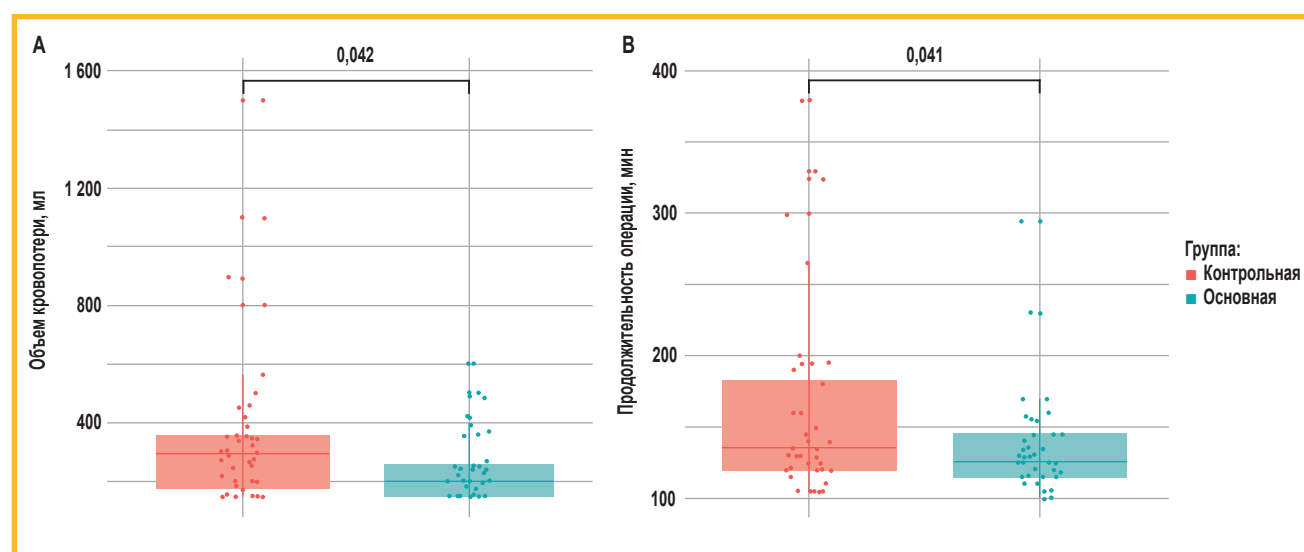


Рис. 5. Боксплоты, отражающие статистическую значимость между контрольной и основной группами при анализе объема: А — кровопотери; В — продолжительности оперативного вмешательства

Figure 5. Boxplots reflecting the statistical significance of the difference between the control group and main group in: A, blood loss volume; B, the duration of surgery

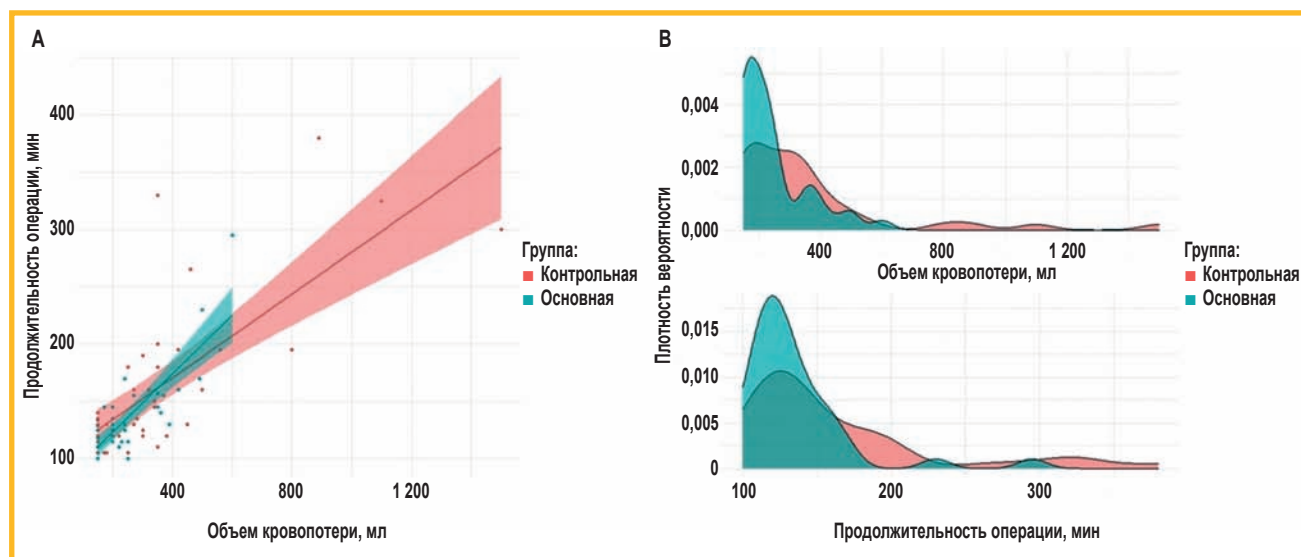


Рис. 6. Диаграмма рассеяния с линиями тренда, отражающая положительную корреляцию у пациентов основной и контрольной групп между объемом кровопотери и продолжительностью операции (точки на диаграмме представляют собой отдельные наблюдения) (А); графики плотности вероятности по исследуемым показателям для пациентов обеих групп (В)

Figure 6. Scatter plot with trend lines shows the positive correlation between the volume of blood loss and the duration of surgery in the main and control groups; the points on the diagram represent individual observations (A). Probability density plots for the studied parameters for both groups (B)

По данным зарубежной литературы, применение в качестве хирургического шаблона изготовленной с использованием аддитивных технологий физической модели легочной ткани способствует не только уменьшению количества возможных осложнений в процессе операции, но и сокращению продолжительности оперативного вмешательства [23, 24] и послеоперационного периода [25], а также улучшению коммуникации врача с пациентом [26]. Также следует отметить, что у пациентов 1-й группы удалось не только сократить время, затраченное на оперативный сеанс, но и уменьшить объем кровопотери, что подтвердилось при статистической обработке данных.

По данным исследований *M.P.Kim et al.* [27] и *T.Nakada et al.* [28] показано, что благодаря использованию предоперационного моделирования легочной ткани больному с опухолью легкого и пациенту с планируемой субсегментэктомией удалось провести органосохраняющие операции, свести к минимуму уровень травматизации мягких тканей и уменьшить частоту удаления интактной ткани легкого. Данные выводы находят свое отражение в проведенном исследовании за счет установленной корреляции средней силы ($\rho = 0,54$; $p < 0,001$) между переменными объема кровопотери и длительностью операции у пациентов основной группы при использовании критерия Спирмена. Положительная корреляция наблюдалась и при анализе с использованием критерия Кендалла ($\tau = 0,42$; $p < 0,001$). Таким образом, при использовании трехмерных анатомических моделей легких улучшаются хирургические показатели.

Заключение

Благодаря установленным различиям между пациентами основной и контрольной групп в отношении параметров объема кровопотери и продолжительности

оперативного вмешательства при предоперационной подготовке торакальных хирургов с использованием полимерных макетов легких подтвердилась гипотеза о влиянии аддитивных технологий на указанные индикаторы, что свидетельствует о значимости примененного метода реконструкции. Однако требуется дальнейшее изучение возможностей технологий быстрого прототипирования в аспекте создания биоразлагаемых имплантов, замещающих легочные ткани, которые смогут компенсировать резецированное легкое, что приведет к снижению рисков появления остаточных полостей.

Литература

1. Нечаева О.Б. Состояние и перспективы противотуберкулезной службы России в период COVID-19. *Туберкулез и болезни легких*. 2020; 98 (12): 7–19. DOI: 10.21292/2075-1230-2020-98-12-7-19.
2. Нечаева О.Б. Эпидемическая ситуация по туберкулезу в России. *Туберкулез и болезни легких*. 2018; 96 (8): 15–24. DOI: 10.21292/2075-1230-2018-96-8-15-24.
3. Нечаева О.Б. Туберкулез у детей в России. *Туберкулез и болезни легких*. 2020; 98 (11): 12–20. DOI: 10.21292/2075-1230-2020-98-11-12-20.
4. Рогожкин П.В., Бородулина Е.А. Отдаленные результаты лечения больных туберкулезом легких, перенесших радикальную резекцию легких. *Туберкулез и болезни легких*. 2018; 96 (3): 24–28. DOI: 10.21292/2075-1230-2018-96-3-24-28.
5. Гиллер Д.Б., Мургулов И.Б., Мартель И.И. и др. Повторные резекции легкого у больных с послеоперационным рецидивом туберкулеза в оперированном легком (обзор литературы и собственные данные). *Хирургия. Журнал им. Н.И.Пирогова*. 2015; (8, часть 2): 14–19. DOI: 10.17116/hirurgia20158214-19.
6. Краснов В.А., Грищенко Н.Г., Андренко А.А. Повторные операции у больных с деструктивными формами пострезекционных реактиваций туберкулеза легких. *Туберкулез и экология*. 1997; (1): 13–15.
7. Щаденко С.В., Горбачева А.С., Арсланова А.Р., Толмачев И.В. 3D-визуализация для планирования операций и выполнения хирургического вмешательства (CAS-технологии). *Бюллетень сибирской медицины*. 2014; 13 (4): 165–171. Доступно на: <https://>

- cyberleninka.ru/article/n/3d-vizualizatsiya-dlya-planirovaniya-operatsiy-i-vypolneniya-hirurgicheskogo-vmeshatelstva-cas-tehnologii/viewer
8. Лазаренко В.А., Иванов С.В., Иванов И.С. и др. Использование 3D-принтеров в хирургии (обзор литературы). *Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье»*. 2018; (4): 61–65. DOI: 10.21626/vestnik/2018-4/10.
9. Арапова И.А., Кучерова П.А. 3D-печать в челюстно-лицевой хирургии. *Главный врач Юга России*. 2017; 58 (5): 13–15. Доступно на: <http://www.akvarel2002.ru/assets/files/journal/GV-58-preview.pdf>
10. Приходько А.А., Виноградов К.А., Вахрушев С.Г. Меры по развитию медицинских аддитивных технологий в Российской Федерации. *Медицинские технологии. Оценка и выбор*. 2019; 36 (2): 10–15. Доступно на: <https://cyberleninka.ru/article/n/mery-po-razvitiyu-meditsinskih-additivnyh-tehnologii-v-rossiyskoy-federatsii>
11. Керимбаев Т.Т., Алейников В.Г., Смагул Ж. и др. Обзор применения 3D технологий в хирургическом лечении опухолей позвоночника. *Нейрохирургия и неврология Казахстана*. 2017; (4 (49)): 61–65. Доступно на: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeneniya-3d-tehnologii-v-hirurgicheskom-lechenii-opuholey-pozvonochnika>
12. Багатурия Г.О. Перспективы использования 3D-печати при планировании хирургических операций. *Медицина: теория и практика*. 2016; (1): 26–35. Доступно на: <http://ojs3.gpmu.org/index.php/med-theory-and-practice/article/view/249/262>
13. Mulberry G., White K.A., Vaidya M. et al. 3D printing and milling a real-time PCR device for infectious disease diagnostics. *PLoS One*. 2017; 12 (6): e0179133. DOI: 10.1371/journal.pone.0179133.
14. Öblom H., Zhang J., Pimparade M. et al. 3D-printed isoniazid tablets for the treatment and prevention of tuberculosis-personalized dosing and drug release. *AAPS PharmSciTech*. 2019; 20 (2): 52. DOI: 10.1208/s12249-018-1233-7.
15. Guibert N., Mhanna L., Didier A. et al. Integration of 3D printing and additive manufacturing in the interventional pulmonologists's toolbox. *Respir. Med*. 2018; 134: 139–142. DOI: 10.1016/j.rmed.2017.11.019.
16. Jamroz W., Szafraniec J., Kurek M., Jachowicz R. 3D printing in pharmaceutical and medical applications – recent achievements and challenges. *Pharm. Res*. 2018; 35 (9): 176. DOI: 10.1007/s11095-018-2454-x.
17. Rengier F., Mehndiratta A., von Tengg-Kobligh H. et al. 3D printing base on imaging data: review of medical applications. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg*. 2010; 5 (4): 335–341. DOI: 10.1007/s11548-010-0476-x.
18. Giannopoulos A.A., Mitsouras D., Yoo S.J. et al. Applications of 3D printing in cardiovascular diseases. *Nat. Rev. Cardiol*. 2016; 13 (12): 701–718. DOI: 10.1038/nrcardio.2016.170.
19. Ventola C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *P. T*. 2014; 39 (10): 704–711.
20. Peterson G.I., Larsen M.B., Ganter M.A. et al. 3D-printed mechanochromic materials. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015; 7 (1): 577–583. DOI: 10.1021/am506745m.
21. Anciaux S.K., Geiger M., Bowser M.T. 3D printed micro free-flow electrophoresis device. *Anal. Chem*. 2016; 88 (15): 7675–7682. DOI: 10.1021/acs.analchem.6b01573.
22. Wang X., Ao Q., Tian X. et al. 3D bioprinting technologies for hard tissue and organ engineering. *Materials (Basel)*. 2016; 9 (10): 802. DOI: 10.3390/ma9100802.
23. O'Brien E.K., Wayne D.B., Barsness K.A. et al. Use of 3D printing for medical education models in transplantation medicine: a critical review. *Curr. Transpl. Rep*. 2016; 3 (1): 109–119. DOI: 10.1007/s40472-016-0088-7.
24. Perica E., Sun Z. Patient-specific three-dimensional printing for pre-surgical planning in hepatocellular carcinoma treatment. *Quant. Imaging Med. Surg*. 2017; 7 (6): 668–677. DOI: 10.21037/qims.2017.11.02.
25. Aimar A., Palermo A., Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art. *J. Healthc. Eng*. 2019; 2019: 5340616. DOI: 10.1155/2019/5340616.
26. Kwok J.K.S., Lau R.W.H., Zhao Z.R. et al. Multi-dimensional printing in thoracic surgery: current and future applications. *J. Thorac. Dis*. 2018; 10 (Suppl. 6): S756–763. DOI: 10.21037/jtd.2018.02.91.
27. Kim M.P., Ta A.H., Ellsworth W.A. 4th et al. Three dimensional model for surgical planning in resection of thoracic tumors. *Int. J. Surg. Case Rep*. 2015; 16: 127–129. DOI: 10.1016/j.ijscr.2015.09.037.
28. Nakada T., Akiba T., Inagaki T., Morikawa T. Thoracoscopic anatomical subsegmentectomy of the right S2b + S3 using a 3D printing model with rapid prototyping. *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg*. 2014; 19 (4): 696–698. DOI: 10.1093/icvts/ivu174.

Поступила: 24.02.21
Принята к печати: 11.05.21

References

1. Nechaeva O.B. [The state and prospects of TB control service in Russia during the COVID-19 pandemic]. *Tuberkulez i bolezni legkikh*. 2020; 98 (12): 7–19. DOI: 10.21292/2075-1230-2020-98-12-7-19 (in Russian).
2. Nechaeva O.B. [TB situation in Russia]. *Tuberkulez i bolezni legkikh*. 2018; 96 (8): 15–24. DOI: 10.21292/2075-1230-2018-96-8-15-24 (in Russian).
3. Nechaeva O.B. [Tuberculosis in children in Russia]. *Tuberkulez i bolezni legkikh*. 2020; 98 (11): 12–20. DOI: 10.21292/2075-1230-2020-98-11-12-20 (in Russian).
4. Rogozhkin P.V., Borodulina E.A. [The Postponed treatment outcomes in pulmonary tuberculosis patients after radical pulmonary resection]. *Tuberkulez i bolezni legkikh*. 2018; 96 (3): 24–28. DOI: 10.21292/2075-1230-2018-96-3-24-28 (in Russian).
5. Giller D.B., Murgustov I.B., Martel' I.I. et al. [Repeated lung resections in patients with postoperative recurrent tuberculosis in the operated lung (literature review and own data)]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova*. 2015; (8, Pt 2): 14–19. DOI: 10.17116/hirurgia20158214-19 (in Russian).
6. Krasnov V.A., Grishchenko N.G., Andrenko A.A. [Reoperations in patients with destructive forms of post-resection reactivation of pulmonary tuberculosis]. *Tuberkulez i ekologiya*. 1997; (1): 13–15 (in Russian).
7. Shchadenko S.V., Gorbacheva A.S., Arslanova A.R., Tolmachev I.V. [3D visualization for planning operations and performing surgery (CAS technologies)]. *Byulleten' sibirskoy meditsiny*. 2014; 13 (4): 165–171. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/3d-vizualizatsiya-dlya-planirovaniya-operatsiy-i-vypolneniya-hirurgicheskogo-vmeshatelstva-cas-tehnologii/viewer> (in Russian).
8. Lazarenko V.A., Ivanov S.V., Ivanov I.S. et al. [Use of 3D printers in surgery (literature review)]. *Kurskiy nauchno-prakticheskiy vestnik «Chelovek i ego zdorov'e»*. 2018; (4): 61–65. DOI: 10.21626/vestnik/2018-4/10 (in Russian).
9. Arapova I.A., Kucherova P.A. [3D printing in maxillofacial surgery]. *Glavnyy vrach Yuga Rossii*. 2017; 58 (5): 13–15. Available at: <http://www.akvarel2002.ru/assets/files/journal/GV-58-preview.pdf> (in Russian).
10. Prikhod'ko A.A., Vinogradov K.A., Vakhruшев S.G. [Measures for the development of medical additive technologies in the russian federation]. *Meditsinskie tekhnologii. Otsenka i vybor*. 2019; 36 (2): 10–15. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/mery-po-razvitiyu-meditsinskih-additivnyh-tehnologii-v-rossiyskoy-federatsii> (in Russian).
11. Kerimbaev T.T., Aleynikov V.G., Smagul Zh. et al. [An overview of the use of 3D technologies in the surgical treatment of spinal tumors]. *Neyrokhirurgiya i nevrologiya Kazakhstana*. 2017; (4 (49)): 61–65. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeneniya-3d-tehnologii-v-hirurgicheskom-lechenii-opuholey-pozvonochnika> (in Russian).
12. Bagaturiya G.O. [Prospects for the use of 3D-printing when planning surgery]. *Meditsina: teoriya i praktika*. 2016; (1): 26–35. Available at: <http://ojs3.gpmu.org/index.php/med-theory-and-practice/article/view/249/262> (in Russian).
13. Mulberry G., White K.A., Vaidya M. et al. 3D printing and milling a real-time PCR device for infectious disease diagnostics. *PLoS One*. 2017; 12 (6): e0179133. DOI: 10.1371/journal.pone.0179133.
14. Öblom H., Zhang J., Pimparade M. et al. 3D-printed isoniazid tablets for the treatment and prevention of tuberculosis-personalized dosing and drug release. *AAPS PharmSciTech*. 2019; 20 (2): 52. DOI: 10.1208/s12249-018-1233-7.
15. Guibert N., Mhanna L., Didier A. et al. Integration of 3D printing and additive manufacturing in the interventional pulmonologists's toolbox. *Respir. Med*. 2018; 134: 139–142. DOI: 10.1016/j.rmed.2017.11.019.
16. Jamroz W., Szafraniec J., Kurek M., Jachowicz R. 3D printing in pharmaceutical and medical applications – recent achievements and

- challenges. *Pharm. Res.* 2018; 35 (9): 176. DOI: 10.1007/s11095-018-2454-x.
17. Rengier F., Mehndiratta A., von Tengg-Kobligh H. et al. 3D printing base on imaging data: review of medical applications. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2010; 5 (4): 335–341. DOI: 10.1007/s11548-010-0476-x.
 18. Giannopoulos A.A., Mitsouras D., Yoo S.J. et al. Applications of 3D printing in cardiovascular diseases. *Nat. Rev. Cardiol.* 2016; 13 (12): 701–718. DOI: 10.1038/nrcardio.2016.170.
 19. Ventola C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *P. T.* 2014; 39 (10): 704–711.
 20. Peterson G.I., Larsen M.B., Ganter M.A. et al. 3D-printed mechanochromic materials. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015; 7 (1): 577–583. DOI: 10.1021/am506745m.
 21. Anciaux S.K., Geiger M., Bowser M.T. 3D printed micro free-flow electrophoresis device. *Anal. Chem.* 2016; 88 (15): 7675–7682. DOI: 10.1021/acs.analchem.6b01573.
 22. Wang X., Ao Q., Tian X. et al. 3D bioprinting technologies for hard tissue and organ engineering. *Materials (Basel).* 2016; 9 (10): 802. DOI: 10.3390/ma9100802.
 23. O'Brien E.K., Wayne D.B., Barsness K.A. et al. Use of 3D printing for medical education models in transplantation medicine: a critical review. *Curr. Transpl. Rep.* 2016; 3 (1): 109–119. DOI: 10.1007/s40472-016-0088-7.
 24. Perica E., Sun Z. Patient-specific three-dimensional printing for pre-surgical planning in hepatocellular carcinoma treatment. *Quant. Imaging Med. Surg.* 2017; 7 (6): 668–677. DOI: 10.21037/qims.2017.11.02.
 25. Aimar A., Palermo A., Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art. *J. Healthc. Eng.* 2019; 2019: 5340616. DOI: 10.1155/2019/5340616.
 26. Kwok J.K.S., Lau R.W.H., Zhao Z.R. et al. Multi-dimensional printing in thoracic surgery: current and future applications. *J. Thorac. Dis.* 2018; 10 (Suppl. 6): S756–763. DOI: 10.21037/jtd.2018.02.91.
 27. Kim M.P., Ta A.H., Ellsworth W.A. 4th et al. Three dimensional model for surgical planning in resection of thoracic tumors. *Int. J. Surg. Case Rep.* 2015; 16: 127–129. DOI: 10.1016/j.ijscr.2015.09.037.
 28. Nakada T., Akiba T., Inagaki T., Morikawa T. Thoracoscopic anatomical subsegmentectomy of the right S2b + S3 using a 3D printing model with rapid prototyping. *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg.* 2014; 19 (4): 696–698. DOI: 10.1093/icvts/ivu174.

Received: February 24, 2021

Accepted for publication: May 11, 2021

Информация об авторах / Author Information

Наумов Алексей Георгиевич — ассистент кафедры фтизиатрии имени И.С.Николаева Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (831) 234-05-60 (доб. 560); e-mail: naumovag@pimunn.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0412-6877>)

Aleksey G. Naumov, Assistant, Phthisiology Department named after I.S. Nikolaev, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Privolzhsky Research Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation; tel.: (831) 234-05-60 (ad. 560); e-mail: naumovag@pimunn.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0412-6877>)

Шпрыков Александр Сергеевич — д. м. н., профессор, заведующий кафедрой фтизиатрии имени И.С.Николаева Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (831) 234-05-60 (доб. 560); e-mail: shprykov_a@pimunn.net (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-6704>)

Aleksandr S. Shprykov, Doctor of Medicine, Professor, Head of the Phthisiology Department named after I.S. Nikolaev, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Privolzhsky Research Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation; tel.: (831) 234-05-60 (ad. 560); e-mail: shprykov_a@pimunn.net (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-6704>)

Крюков Эмиль Ришатович — студент IV курса лечебного факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (831) 234-05-60 (доб. 560); e-mail: emilprmu@gmail.com (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-0448>)

Emil R. Kryukov, IV year student, Medicine Faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Privolzhsky Research Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation; tel.: (831) 234-05-60 (ad. 560); e-mail: emilprmu@gmail.com (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-0448>)

Участие авторов

Наумов А.Г. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста

Шпрыков А.С. — редактирование текста

Крюков Э.Р. — статистическая обработка

Все авторы внесли существенный вклад в проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию до публикации.

Authors Contribution

Naumov A.G. — concept and design of the study, collection and processing of the material, writing the text

Shprykov A.S. — text editing

Kryukov E.R. — statistical analysis

All authors made a significant contribution to the search and analytical work and preparation of the article, read and approved the final version before publication.