

Ассоциация нейрохирургов России  
Межрегиональная общественная организация  
«Общество по детской нейрохирургии»  
Общество детских неврологов  
при Ассоциации неврологов Санкт-Петербурга  
и Ленинградской области  
«РНХИ им. проф. А.Л. Поленова» —  
филиал ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
**НЕЙРОХИРУРГИЯ И НЕВРОЛОГИЯ**  
ДЕТСКОГО ВОЗРАСТА

№ 2–3 (60–61) 2019

Дата подписания в печать: 16.09.2019

Издается с 2002 г.  
Выходит 4 раза в год  
ISSN 1680-6786

На обложке: Х.У. Кушинг и И.П. Павлов в августе 1929 г. во время визита  
И.П. Павлова в Бостон (США) на XIII Международный физиологический конгресс

**Учредители**

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение «Российский  
научно-исследовательский  
нейрохирургический институт  
имени профессора А.Л. Поленова»  
Министерства здравоохранения  
Российской Федерации; Хачатрян В.А.;  
Кондаков Е.Н.; Левин Е.Р.

**Адрес редакции**

191014, Санкт-Петербург,  
ул. Маяковского, д. 12

Ответственный за номер проф. Е. Н. Кондаков

Перепечатка материалов допускается только  
с письменного разрешения редакции журнала.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации,  
содержащейся в рекламных материалах.

Тираж 1000 экз. Заказ № 1904

Бесплатно

**Издатель**

Издательство «Нестор-История»  
197110, Санкт-Петербург,  
Петрозаводская ул., д. 7  
Тел. (812)235-15-86  
E-mail: nestor\_historia@list.ru  
www.nestorbook.ru

**Типография**

«Нестор-История»  
Тел. (812) 235-15-86

**18+**

**Редакционная коллегия**

Хачатрян В.А., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург) — главный редактор  
Гармашов Ю.А., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург) — зам. главного редактора  
Гузева В.И., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург) — зам. главного редактора

Артарян А.А., д.м.н., проф. (Москва)	Пронин И.Н., д.м.н., проф., академик РАН (Москва)
Акшулаков С.К., д.м.н., проф., академик НАН Казахстана (Астана)	Сафин Ш.М., д.м.н., проф. (Уфа)
Батышева Т.Т., д.м.н., проф. (Москва)	Семенова Ж.Б., д.м.н., проф. (Москва)
Берснев В.П., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)	Скоромец А.П., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)
Вербова Л.Н., д.м.н., проф. (Киев)	Скрипченко Н.В., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)
Гайдар Б.В., д.м.н., проф., академик РАН (Санкт-Петербург)	Трофимова Т.Н., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)
Горбунова В.Н., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)	Щербук Ю.А., д.м.н., проф., академик РАН (Санкт-Петербург)
Горельшев С.К., д.м.н., проф. (Москва)	Choi J.U., проф. (Seoul)
Иова А.С., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)	Constantini Sh., проф. (Tel Aviv)
Кондаков Е.Н., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)	Di Rocco C., проф. (Hannover)
Кондратьев А.Н., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)	Jurkiewicz J., проф. (Warszawa)
Меликян А.Г., д.м.н. (Москва)	Kato Y., проф. (Toyoake)
Отеллин В.А., д.м.н., проф., член-корр. РАН (Санкт-Петербург)	Samii M., проф. (Hannover)
	Tomita T., проф. (Chicago)

**Редакционный совет**

Ахмедиев М.Л., д.м.н., проф. (Ташкент)	Кузенкова Л.М., д.м.н., проф. (Москва)
Балязин В.А., д.м.н., проф. (Ростов-на-Дону)	Лазебник Т.А., к.м.н. (Санкт-Петербург)
Белогурова М.Б., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург)	Ларионов С.Н., д.м.н. (Санкт-Петербург)
Белопасов В.В., д.м.н., проф. (Астрахань)	Ларькин В.И., д.м.н. (Омск)
Духовский А.Э., к.м.н. (Днепр)	Мартиросян М.М., д.м.н., проф. (Ереван)
Еликбаев Г.М., д.м.н. (Шымкент)	Музлаев Г.Г., д.м.н., проф. (Краснодар)
Забродская Ю.М., д.м.н. (Санкт-Петербург)	Саввина И.А., д.м.н. (Санкт-Петербург)
Зиненко Д.Ю., д.м.н. (Москва)	Стариков А.С., д.м.н., проф. (Рязань)
Кариев Г.М., д.м.н., проф. (Ташкент)	Талабаев М.В., к.м.н. (Минск)
Ковтун О.П., д.м.н., проф. (Екатеринбург)	Чмутин Г.Е., д.м.н. (Москва)
Крюков Е.Ю., д.м.н. (Санкт-Петербург)	

**Секретариат**

Абрамов К.Б., к.м.н. (Санкт-Петербург) — секретарь

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Журнал включен в научную электронную библиотеку eLIBRARY.RU.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Подписку на журнал можно оформить по Каталогу российской прессы «Роспечать» в региональном указателе «Санкт-Петербург и Ленинградская область», индекс 57387.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77 — 55257 от 04.09.2013.

© «Нейрохирургия и неврология детского возраста», 2019  
© Издательство «Нестор-История», 2019

Association of Neurosurgeons of Russia  
Society of Eurasian Pediatric Neurosurgeons  
Society of Pediatric Neurology,  
association of Neurologists of St Petersburg  
and the Province of Leningrad  
Polenov Neurosurgical Institute,  
branch of the Almazov National Medical Research Centre

JOURNAL OF MEDICAL RESEARCH AND PRACTICE  
PEDIATRIC  
**NEUROSURGERY AND NEUROLOGY**

№ 2–3 (60–61) 2019

Printed 16.09.2019

Published since 2002

Four issues per year

ISSN 1680-6786

On cover: H.W. Cushing and I.P. Pavlov, August 1929. During the visit of I.P. Pavlov on the 13<sup>th</sup> International Physiology Congress in Boston (USA)

**Founders**

A.L. Polenov Russian Neurosurgery  
Research Institute Ministry of Health  
care of the Russian Federation;  
William Khachatryan, E. Kondakov,  
E. Levin

**Published by**

Nestor-Historia  
7 Petrozavodskaya Street  
197110, St Petersburg, Russia  
Tel. +7(812)235-15-86  
E-mail: nestor\_historia@list.ru  
www.nestorbook.ru

**Editorial Address**

12 Mayakovsky Street,  
191014, St Petersburg, Russia

Responsible editor prof. E. Kondakov

**Printed at**

Typography of the publishing house  
Nestor-Historia  
Tel. +7(812)235-15-86

No part of this issue's materials may be reproduced or transmitted  
in any form or by any means without the written permission of the Editorial Office.

Editorial Office is not responsible for reliability of the information contained  
in advertizing materials.

Printed in 1000 copies.

Free of charge

**18+**

**Editorial Board**

William Khachatryan, editor-in-chief (St Petersburg, Russia)

Y. Garmashov, deputy editor-in-chief (St Petersburg, Russia)

V. Guzeva, deputy editor-in-chief (St Petersburg, Russia)

A. Artaryan (Moscow, Russia)

S. Akshulakov (Astana, Kazakhstan)

T. Batisheva (Moscow, Russia)

V. Bersnev (St Petersburg, Russia)

L. Verbova (Kiev, Ukraina)

B. Gaydar (St Petersburg, Russia)

V. Gorbunova (Moscow, Russia)

S. Gorelishev (Moscow, Russia)

A. Iova (St Petersburg, Russia)

E. Kondakov (St Petersburg, Russia)

A. Kondratev (St Petersburg, Russia)

A. Melikyan (Moscow, Russia)

V. Otellin (St Petersburg, Russia)

I. Pronin (Moscow, Russia)

Sh. Safin (Ufa, Russia)

J. Semenova (Moscow, Russia)

A. Skoromets (St Petersburg, Russia)

N. Scripchenko (St Petersburg, Russia)

T. Trofimova (St Petersburg, Russia)

Y. Shcherbuk (St Petersburg, Russia)

J.U. Choi (Seoul, South Korea)

Sh. Constantini (Tel Aviv, Israel)

Di Rocco C. (Hannover, Germany)

J. Jurkiewicz (Warsaw, Poland)

Y. Kato (Toyoake, Japan)

M. Samii (Hannover, Germany)

T. Tomita (Chicago, USA)

**Advisory Board**

M. Achmediev (Tashkent, Uzbekistan)

V. Balyazin (Rostov-on-Don, Russia)

M. Belogurova (St Petersburg, Russia)

V. Belopasov (Astrakhan, Russia)

A. Dukhovskii (Dnepr, Ukraina)

G. Yelikbaev (Shymkent, Kazakhstan)

Yu. Zabrodskaia (St Petersburg, Russia)

D. Zinenko (Moscow, Russia)

G. Kariev (Tashkent, Uzbekistan)

E. Krjukov (St Petersburg, Russia)

O. Kovtun (Ekaterinburg, Russia)

L. Kusenkova (Moscow, Russia)

T. Lazebnik (St Petersburg, Russia)

S. Larionov (St Petersburg, Russia)

V. Lar'kin (Omsk, Russia)

M. Martirosyan (Yerevan, Armenia)

G. Muzlaev (Krasnodar, Russia)

I. Savvina (St Petersburg, Russia)

A. Starikov (Ryazan, Russia)

M. Talabaev (Minsk, Byelorussia)

G. Chmutin (Moscow, Russia)

**Secretariat**

K. Abramov (St Petersburg, Russia), Secretary

Included in the *List of Russian Peer-Reviewed Journals Publishing Major Research Results of the Dissertations for the Degree of Candidate and Doctor of Sciences.*

Included in the *eLIBRARY.RU* electronic library.

Included in the *Russian Science Citation Index (RSCI).*

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Communications. Mass media registration certificate, PI FS № 77 – 55257, dated 04 September 2013.

© Pediatric Neurosurgery and Neurology, 2019

© Nestor-Historia, 2019

## **ГЛУБОКОУВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!**

На обложке журнала представлена фотография, запечатлевшая встречу лауреата Нобелевской премии, знаменитого физиолога И.П. Павлова и одного из основоположников нейрохирургии Х. Кушинга. Х. Кушинг считал себя представителем научной школы известного английского физиолога А. Черрингтона — также лауреата Нобелевской премии.

Эта фотография в определенном смысле символизирует связь практической нейрохирургии с фундаментальными разделами биологии. Именно это основополагающее взаимодействие объясняет становление нейрохирургии как самостоятельной дисциплины в короткий период времени и дальнейшее ее развитие.

Опираясь на современные им достижения медицинской науки, физиологии и техники, основоположники отечественной и мировой нейрохирургии В.М. Бехтерев, Л.М. Пуссеп, А.Л. Поленов, Х. Кушинг, У. Пенфилд, У. Денди, Х. Оливекруна, Э. Мониш и др. являлись приверженцами инноваций.

И в наши дни обобщение информации, полученной в практической нейрохирургии с позиции фундаментальных разделов биологических наук — нейрохимии, молекулярной биологии, микроанатомии и др., являются основой развития в том числе детской нейрохирургии. С позиции детской нейрохирургии трансляционная медицина открывает широкие возможности внедрения достижений молекулярной генетики, клеточной и таргетной терапии, молекулярной визуализации и других научных разработок в повседневную практику. Этому в большой мере способствует технологический «прорыв» в создании малоинвазивной, функциональной и реконструктивной нейрохирургии. Именно эти направления сегодня являются приоритетными в нейропедиатрической хирургии.

*Главный редактор*

## СОДЕРЖАНИЕ

*Диагностика***ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО КРОВОТОКА И ТЕМПОВ ПСИХОМОТОРНОГО РАЗВИТИЯ ДЕТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ КРАНИОСИНСТОЗОВ**А.А. Сысоева, Г.В. Летыгин, С.А. Ким, В.Е. Данилин,  
Н.В. Чищина ..... 8**ЭЛЕКТРОНЕЙРОМИОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СИНДРОМА МЫШЕЧНОЙ ГИПОТОНИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО И МИОПАТИЧЕСКОГО ГЕНЕЗОВ У ДЕТЕЙ РАННЕГО ВОЗРАСТА**К.Ю. Моллаева, В.Н. Команцев, З.Р. Умаханова,  
С.Т. Григорьев ..... 16*Литературный обзор***АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕЙРОХИРУРГИИ. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР**

В.П. Иванов, А.В. Ким, К.А. Сулин, В.А. Хачатрян ..... 26

*Неврология***ОСОБЕННОСТИ КЛЕТОЧНОГО ИММУННОГО ОТВЕТА ПРИ ВЕТРЯНОЧНОМ ЭНЦЕФАЛИТЕ, ОСЛОЖНЕННОМ СИМПТОМАТИЧЕСКИМИ СУДОРОГАМИ**Н.В. Скрипченко, Л.А. Алексеева, Е.Ю. Горелик,  
А.В. Суровцева, А.А. Жирков, Н.В. Марченко,  
Т.В. Бессонова ..... 39**ВЛИЯНИЕ НОСИТЕЛЬСТВА ПОЛИМОРФИЗМОВ ГЕНОВ ФОЛАТНОГО ЦИКЛА НА РИСК РАЗВИТИЯ ИНСУЛЬТОВ У ДЕТЕЙ**Ш.Ш. Шамансуров, С.О. Назарова, Х.Я. Каримов,  
К.Т. Бобоев ..... 44*Нейрохирургия***ИНТЕНСИВНАЯ ТЕРАПИЯ ТЯЖЕЛОЙ ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМЫ У ДЕТЕЙ**

Ю.С. Александрович, К.В. Пшениснов ..... 52

**РЕКОНСТРУКТИВНАЯ ХИРУРГИЯ БРАХИОЦЕФАЛЬНЫХ АРТЕРИЙ**Д.Ю. Усачев, В.А. Лукшин, Е.В. Шевченко, А.А. Шулгина,  
А.Д. Ахмедов, А.Д. Соснин, А.В. Шмигельский,  
К.А. Козлова ..... 67

## CONTENTS

*Diagnostics***RESEARCH OF CEREBRAL BLOOD FLOW AND NERVOUS AND MENTAL DEVELOPMENT RATE OF CHILDREN WITH DIFFERENT TYPES OF CRANIOSINOSTOSIS**A.A. Sysoeva, G.V. Letyagin, S.A. Kim, V.E. Danilin,  
N.V. Chishchina ..... 8**ELECTRONEUROMYOGRAPHIC DIFFERENTIATING OF MUSCLE HYPOTONIA SYNDROME OF MYOPATHIC AND CENTRAL ORIGIN IN YOUNG CHILDREN**K.Y. Mollaeva, V.N. Komantsev, Z.R. Umakhanova,  
S.G. Grigoriev ..... 16*Literature review***ADDITIVE TECHNOLOGIES IN NEUROSURGERY. LITERATURE REVIEW**

V.P. Ivanov, A.V. Kim, K.A. Sulin, W.A. Khachatryan ..... 26

*Neurology***PECULIARITIES OF CELLULAR IMMUNE RESPONSE IN WIND ENCEPHALITE COMPLICATED BY SYMPTOMATIC SHIPS**N.V. Skripchenko, L.A. Alekseeva, E.Y. Gorelik, A.V. Surovtseva,  
A.A. Zhirkov, N.V. Martchenko, T.V. Bessonova ..... 39**EFFECT OF THE FOLATE CYCLE GENES POLYMORPHISM ON THE RISK OF CHILDHOOD STROKE**Sh.Sh. Shamansurov, S.O. Nazarova, Kh. Y. Karimov,  
K.T. Boboyev ..... 44*Neurosurgery***INTENSIVE THERAPY OF SEVERE TRAUMATIC BRAIN INJURY AT CHILDREN**

Yu. S. Aleksandrovich, K.V. Pshenisnov ..... 52

**RECONSTRUCTIVE SURGERY ON BRACHIOCEPHALIC ARTERIES**D.Yu. Usachev, V.A. Lukshin, E.V. Shevchenko, A.A. Shulgina,  
A.D. Ahmadov, A.V. Shmigelskiy, K.A. Kozlova ..... 67

**ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ В НЕЙРОХИРУРГИИ:  
СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР**

В.А. Бывальцев, А.А. Калинин, В.В. Шепелев, Ю.А. Пестряков,  
М.А. Алиев, Р.А. Полькин, С.В. Очкал, Ф.С. Малков,  
В.А. Хачатрян .....75

**3D-PRINTING TECHNOLOGY IN NEUROSURGERY:  
A SYSTEMATIC REVIEW**

V.A. Byvaltsev, A.A. Kalinin, V.V. Shepelev, Yu.Ya. Pestryakov,  
M.A. Alyev, R.A. Polkin, S.V. Ochkal, F.S. Malkov,  
W.A. Khachatryan .....75

*Клиническое наблюдение*

**ПОЛИОМИЕЛИТ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ:  
НЕ МИФ, А РЕАЛЬНОСТЬ (КЛИНИЧЕСКОЕ  
НАБЛЮДЕНИЕ)**

Н.В. Скрипченко, В.Ю. Лобзин, В.Н. Савостьянова,  
Н.В. Марченко, М.В. Савина, Н.В. Кормишина,  
Н.Ф. Пульман, Е.М. Вишневецкая .....99

*Clinical case*

**POLIOMYELITIS IN MODERN CONDITIONS: NOT  
MYTH, BUT REALITY (CLINICAL OBSERVATION)**

N.V. Skripchenko, V.Yu. Lobzin, V.N. Savostyanova,  
N.V. Marchenko, M.V. Savina, N.V. Kormishina, N.F. Pulman,  
E.M. Vishnevetskaya .....99

**ОСОБЕННОСТИ УСТРАНЕНИЯ  
ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОГО КОСТНОГО  
ДЕФЕКТА СВОДА ЧЕРЕПА ПРИ ГЕМОФИЛИИ.  
КЛИНИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ И ОБЗОР  
ЛИТЕРАТУРЫ**

Л.А. Сатанин, А.Л. Иванов, А.В. Сахаров, Н.В. Леменева,  
В.В. Рогинский, А.С. Куликов .....108

**FEATURES OF THE ELIMINATION OF POST-  
TRAUMATIC BONE DEFECT OF THE CRANIAL  
VAULT IN HEMOPHILIA. CLINICAL OBSERVATION  
AND LITERATURE REVIEW**

L.A. Satanin, A.L. Ivanov, A.V. Sakharov, N.V. Lemeneva,  
V.V. Roginsky, A.S. Kulikov .....108

*Научно-практические конференции, семинары*

**ПРОТОКОЛ ЗАСЕДАНИЯ АССОЦИАЦИИ  
ДЕТСКИХ ТРАВМАТОЛОГОВ-ОРТОПЕДОВ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА 26 АПРЕЛЯ 2019 г.....118**

*Science-Practical conferences, seminars*

**PROTOCOL OF THE SESSION OF THE ASSOCIATION  
OF PEDIATRIC TRAUMATOLOGISTS-ORTHOPEDISTS  
OF ST. PETERSBURG, APRIL 26, 2019 .....118**

*Некролог*

**ПАМЯТИ  
НИНЕЛЬ АНДРЕЕВНЫ БОРИСОВОЙ.....122**

*Necrology*

**IN MEMORIAM  
OF NINEL ABRAMOVNA BORISOVA .....122**

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ.....124**

**RULES FOR AUTHORS.....124**

**ЭТИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА И ТРЕБОВАНИЯ  
К ПУБЛИКАЦИЯМ.....126**

**ETHICAL RULES AND REQUIREMENTS  
TO PUBLICATIONS .....126**

© Коллектив авторов, 2019

## ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ В НЕЙРОХИРУРГИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

**В.А. Бывальцев<sup>1, 2, 3, 4</sup>, А.А. Калинин<sup>1, 2</sup>, В.В. Шепелев<sup>1</sup>, Ю.А. Пестряков<sup>1</sup>, М.А. Алиев<sup>1</sup>,  
Р.А. Полькин<sup>1</sup>, С.В. Очкал<sup>1</sup>, Ф.С. Малков<sup>5, 6</sup>, В.А. Хачатрян<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Дорожная клиническая больница на ст. Иркутск-Пассажирский, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский научный центр хирургии и травматологии, Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Иркутская государственная академия последипломного образования, Иркутск, Россия

<sup>5</sup> Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>6</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

<sup>7</sup> Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

*Использование трехмерных моделей в последние годы активно внедряется в медицинскую практику. Потенциальные возможности 3D-печати многообразны. Эта статья представляет систематический обзор применения данной технологии в различных клинических и академических областях нейрохирургии. Структурированный поиск источников по основным литературным базам данных проводился в соответствии с рекомендациями PRISMA. Статьи, которые соответствовали предопределенным критериям включения и исключения, оценивались с позиций ключевых целей обзора. 120 исследований отобраны для качественного анализа. Неоднородность в дизайне работ и используемых результатах не позволили выполнить мета-анализ. Все публикации, обнаруженные в процессе систематического поиска и включенные в данный обзор, условно разделены согласно основным областям применения в нейрохирургии. 3D-печать является практичным и анатомически точным методом, который позволяет изготавливать индивидуальные модели для пациентов, для хирургического планирования и консультирования, отработки практических навыков и обучения, создания специализированных приспособлений и биосовместимых имплантов. Тем не менее печатным моделям всё еще не хватает функций, которые делают их реалистичными, таких как текстура, плотность, упругость и гемодинамические факторы.*

Ключевые слова: 3D-печать, предоперационное планирование, хирургическая симуляция, трехмерная печать.

## 3D-PRINTING TECHNOLOGY IN NEUROSURGERY: A SYSTEMATIC REVIEW

**V.A. Byvaltsev<sup>1, 2, 3, 4</sup>, A.A. Kalinin<sup>1, 2</sup>, V.V. Shepelev<sup>1</sup>, Yu.Ya. Pestryakov<sup>1</sup>, M.A. Alyev<sup>1</sup>,  
R.A. Polkin<sup>1</sup>, S.V. Ochkal<sup>1</sup>, F.S. Malkov<sup>5, 6</sup>, W.A. Khachatryan<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Irkutsk State Medical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Road Clinical Hospital at "Irkutsk-Passenger" station, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup> Irkutsk State Academy of Postgraduate Education, Irkutsk, Russia

<sup>5</sup> Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>6</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>7</sup> National Medical Research Center named after V.A. Almazov, St. Petersburg, Russia

*The use of three-dimensional models in recent years has been actively introduced in medical practice. The potential for 3D printing is manifold. This article provides a systematic overview of the application of this technology in various clinical and academic areas in neurosurgery. The structural search of the literature on the main literature databases was carried out in accordance with the recommendations of PRISMA. Articles that met predefined inclusion*

*and exclusion criteria were evaluated for key review objectives. 120 studies were selected for qualitative analysis. Heterogeneity in the article design and the results used did not allow for a meta-analysis. All publications found in the process of systematic search and included in this review are conventionally divided according to the main areas of application in neurosurgery. 3D printing is a practical and anatomically accurate method that allows you to make individual models for patients, for surgical planning and counseling, practical skills and training, the creation of specialized devices and biocompatible implants. However, print models still lack the features that make them realistic, such as texture, density, elasticity, and hemodynamic factors.*

Key words: *3D printing, preoperative planning, surgical simulation, three-dimensional printing.*

## Введение

Хирурги всегда сталкивались с трудной задачей проведения операций на сложных анатомических структурах человеческого тела. Благодаря достижениям в области медицинской визуализации такие инструменты, как мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ), сделали диагностику менее инвазивной и более информативной. Эти инструменты предоставляют двухмерные изображения высокого разрешения, но ограничены в своей способности точно отображать сложные структуры. Виртуальные методы реконструкции изображений предлагают лучшее понимание анатомических структур, позволяя вращать или разделять слои трехмерной модели. Тем не менее остаются различия между реальными анатомическими элементами и компьютерными данными. В результате успех хирургических операций во многом зависит от опыта хирурга. Чтобы устранить ограничения при анализе виртуальных изображений, 3D-печать используется для создания физических моделей индивидуальной анатомии пациентов с целью консультирования, предоперационного планирования и обучения [1]. Помимо этого, возможности данной технологии позволяют изготавливать специализированные инструменты, индивидуальные и биологические импланты.

3D-печать можно описать как процесс изготовления трехмерных структур произвольной формы, формирующихся из компьютерных фантомов. Технология позволяет создавать физические модели путем послойного нанесения специальных материалов по смоделированной заранее схеме, что позволяет индивидуально подходить к производству каждого созданного образца [33]. Создание таких 3D-

моделей на основе данных анатомической визуализации (МРТ / МСКТ) можно описать как трехэтапный процесс: (1) получение изображения, (2) его обработка и (3) 3D-печать (рис. 1).

Для производства объектов не требуется разработка особых лекал и применение специализированных инструментов [67]. Из всего многообразия видов и способов 3D-печати выделяют несколько разновидностей, наиболее часто используемых в медицине:

- Печать металлами: эндопротезирование, краниопластика, титановые импланты [112]. Метод отличается высокой стоимостью печати;
- Печать клеточными структурами и биоматериалами: в настоящее время — активно развивающееся направление. Основная цель — печать целых органов для последующей трансплантации, а также имплантов с высокой степенью биосовместимости [99, 109];
- Печать пластиком: изготовление хирургических моделей, планирование операций, моделей для проведения тренингов, форм для последующего изготовления имплантов традиционными методами.

Печать пластиком в свою очередь делится на:

- Печать по технологии FDM (Fused deposition modeling) — послойное наплавление пластика. Доступная технология для создания хирургических моделей [131].
- Печать фотополимерными смолами — позволяет достичь высокоточной детализации органов, опухолей, сосудов и других анатомических структур. Недостатками этого метода являются малая зона печати и хрупкость получаемых моделей;
- Печать термопластами по технологии FDM — для печати имплантов, например межпозвоночных дисков или краниоимплантов

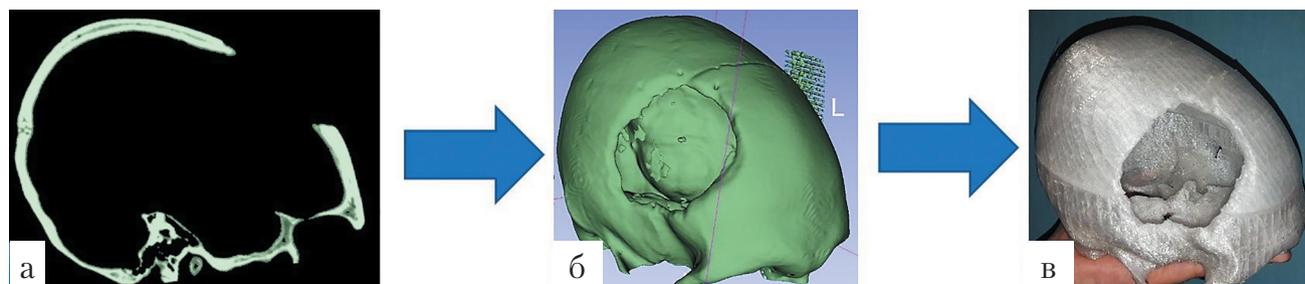


Рис. 1. Блок-схема процесса 3D-печати моделей для клинического применения. Получение изображения — МСКТ пациента с дефектом костей черепа (а). Обработка изображения — 3D-сегментация данных МСКТ (б). 3D-печать — модель черепа пациента с дефектом костей (в)

Fig. 1. A flowchart of the process of 3D printing models for clinical use. Image acquisition — MSCT of a patient with a defect in the skull bones (a). Image processing — 3D segmentation of MSCT data (б). 3D printing is a model of a patient's skull with a bone defect (в)

из биосовместимых материалов, таких как полиэфирэфиркетон (PEEK) [15, 51, 94]. Стоимость гораздо выше, чем у FDM-принтера, печатающего пластиком, и в разы ниже, чем у 3D-принтеров, использующих металлические сплавы.

В нейрохирургии возможности 3D-печати вызывают большой интерес благодаря ряду условий. Во-первых, в настоящее время сложно представить эту специальность без использования большого арсенала инструментальных исследований. Благодаря специальным программам возможно конвертировать изображение, полученное при помощи компьютерной томографии, в анатомически точную модель, что позволяет напечатать область, на которой будет происходить оперативное вмешательство и провести предоперационное планирование. Во-вторых, 3D-печать можно применять для изготовления симуляционных моделей для обучения врачей и ординаторов различным видам хирургической техники на анатомически точных, индивидуализированных моделях [107]. В-третьих, возможности технологии 3D-печати позволяют изготавливать разнообразные импланты, персонализированные для пациента. На сегодняшний день данная технология получила наибольшее распространение среди нейрохирургов при разработке индивидуальных расходных материалов для краниопластики [82, 92].

Учитывая возрастающий интерес к использованию 3D-печати в нейрохирургии в течение последнего десятилетия, мы считаем, что существует необходимость в комплексном, систематическом обзоре этой темы, целью которого является обобщение результатов использования 3D-печати в различных клинических и академических областях нейрохирургии. Помимо анализа направлений применения данной технологии, эта статья также направлена на выявление потенциальных недостатков в применении трехмерной печати, чтобы будущие исследования могли оптимизировать свои усилия для достижения поставленных целей.

## Материалы и методы

**Стратегия поиска и отбора литературных данных.** Для охвата всех исследований, в которых 3D-печать применялась в нейрохирургии, использовалась широкая поисковая стратегия. Выполнен поиск статей в базах данных Medline, Scopus, Cochrane Library и eLibrary, опубликованных в период с января 1990 по апрель 2019 г., описывающих применение технологии 3D-печати в нейрохирургии. Данные были получены двумя авторами и независимо рассмотрены третьим автором. При возникновении разногласий относительно включения исследований в систематический обзор решение принималось коллегиально при участии всего

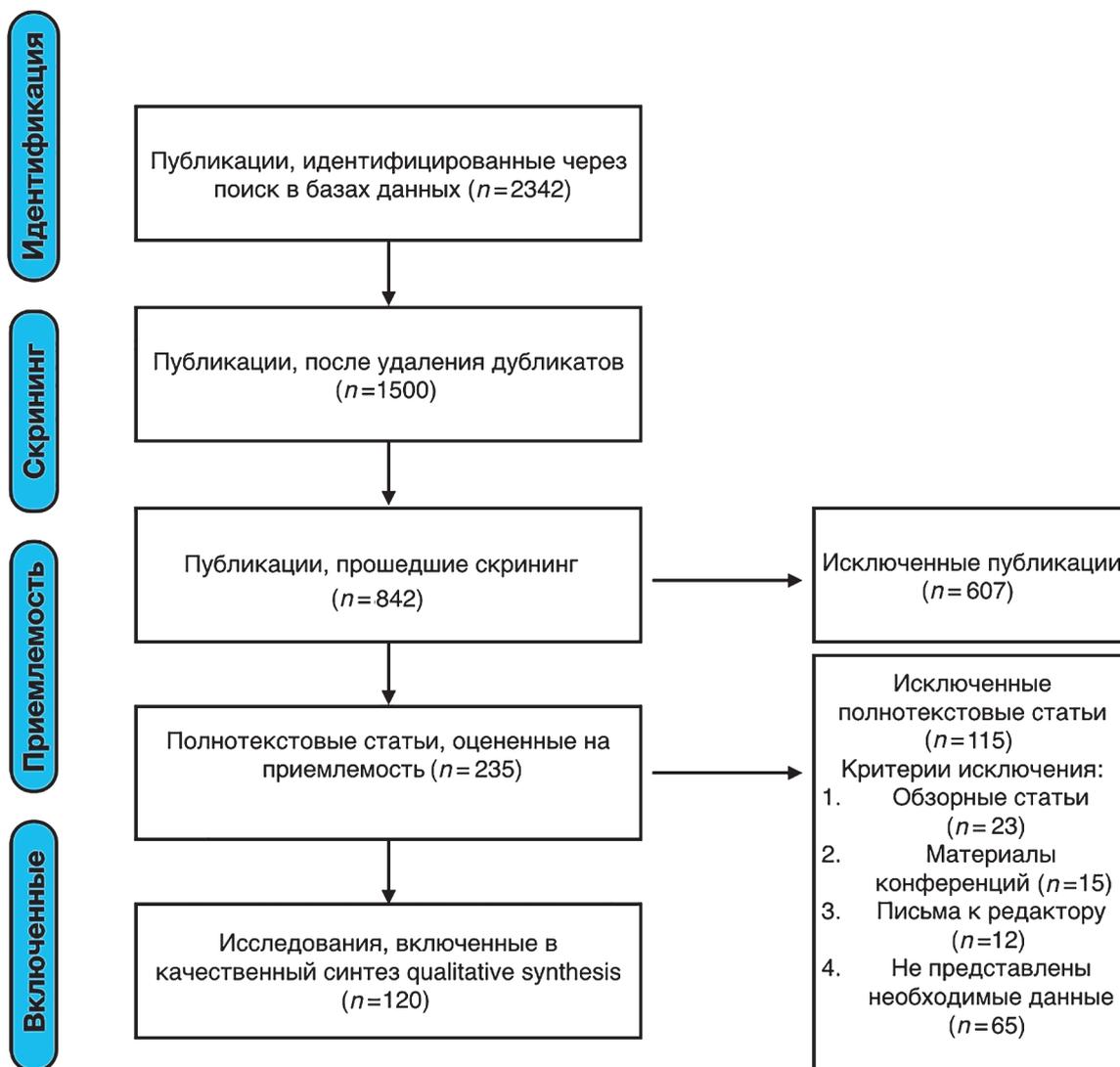


Рис. 2. Стратегия поиска и отбора литературных данных для включения в систематический обзор

Fig. 2. Strategy for searching and selecting literature data for inclusion in a systematic review

авторского коллектива. Исследование выполнено в соответствии с международными рекомендациями по написанию систематических обзоров и метаанализов PRISMA [66].

На первом этапе проводился поиск литературных источников с использованием ключевых слов и их сочетаний: “3D printing”, “neurosurgery”, “three-dimensional printing”, “training”, “education”, “preoperative planning” для англоязычных баз данных, «3D-печать», «нейрохирургия», «предоперационное пла-

нирование», «трехмерная печать», «хирургический тренинг», «хирургическое обучение» — для системы eLibrary. На втором этапе просматривали абстракты статей и исключали публикации, не соответствующие критериям исследования. На третьем этапе просматривали полный текст отобранных статей на соответствие критериям включения и список литературы на наличие релевантных исследований (рис. 2). Обзор статей включал анализ дизайна исследований для определе-

ния качества доказательств и оценки риска предвзятости.

**Критерии включения.** Для анализа применения технологии 3D-печати в нейрохирургии определены следующие критерии включения литературных источников:

(1) включенные исследования: ретроспективные и проспективные когортные исследования, исследования случай–контроль, систематические обзоры, рандомизированные контролируемые исследования, клинические случаи, описания методик изготовления 3D-моделей;

(2) виды оперативных вмешательств: любые оперативные вмешательства, выполняемые на головном и спинном мозге, периферических нервах, костях черепа и позвоночнике;

(3) дизайн исследований: включены все типы исследований, описывающих применение технологии 3D-печати в нейрохирургии.

## Результаты

Согласно критериям соответствия, для анализа отобрано 120 публикаций. Общая характеристика исследований, включенных в настоящий систематический обзор, представлена в табл. 1–4. Все указанные научные работы, обнаруженные в процессе систематического поиска, были условно разделены согласно основным областям применения, в которых может быть использована технология 3D-печати: предоперационное планирование и консультирование пациентов, обучение и хирургический тренинг, изготовление специализированных инструментов и индивидуальных имплантов, изготовление биологических имплантов.

**Предоперационное планирование и консультирование пациентов.** В настоящий момент хирург в процессе планирования и проведения операции в большей степени полагается на свой опыт, знание анатомии и способность превращать серию двухмерных изображений данных нейровизуализации в трехмерные у себя в голове. Тем не менее разработка плана технически сложных оперативных вмешательств, таких как, например, клипирование аневризм, требует полной информации о рас-

положении патологического участка сосуда. Перспективным и наглядным методом предоперационного моделирования является печать моделей сосудов головного мозга. Этот способ позволяет на дооперационном этапе визуализировать локализацию и трехмерную структуру, занимаемую сосудистым дефектом, что позволяет значительно упростить процесс обсуждения и планирования оперативного вмешательства. На данный момент существует ряд исследований, показывающих, что 3D-модели точно отображают анатомию пациента [5, 24, 30, 39, 60, 62, 74, 86, 100, 106, 115, 129]. Описана возможность исследования особенностей гемодинамики при помощи изготовления моделей аневризм для планирования лечения и расчета риска разрыва [20, 55, 110].

Одним из способов предоперационного планирования с использованием 3D-печати является изготовление индивидуальной модели черепа для определения вида операции и формы предполагаемого импланта [31, 77]. Этот метод также используется для планирования хирургической коррекции краниосиностозов у детей [52]. Трехмерная печать используется при планировании пластики основания черепа после тотального удаления объемных образований костей лицевого и мозгового черепа [127]. Большую популярность приобрела технология изготовления индивидуальных образцов для выполнения краниопластики. Данные модели, в отличие от ранее используемых стандартных пластин, позволяют добиться наиболее точной передачи формы черепа в области его дефекта. Благодаря доступности и многообразию материалов для печати удалось снизить стоимость протезов, изготовленных при помощи 3D-принтера, по сравнению со стандартными, не индивидуальными имплантами [2, 18, 19, 21, 27, 50, 81, 92, 108]. Возможно сочетание использования синтетических материалов и костного матрикса с внедрением стволовых клеток соединительной ткани на поверхность протеза после установки. Таким образом, ускоряется естественная регенерация костной ткани в области дефекта [3].

Для более оптимальной передачи границ опухоли и визуализации ее инвазии в смежные

Таблица 1

<b>Общая характеристика исследований, включенных в раздел «Предоперационное планирование и консультирование пациентов» General characteristics of the studies included in the section “Preoperative planning and patient counseling”</b>		
<b>Исследование</b>	<b>Дизайн исследования</b>	<b>Область применения</b>
Mashiko и соавт. 2015 [74]	Случай–контроль, $N = 20$	Сосудистая нейрохирургия
Wurm и соавт. 2014 [129]	Серия случаев, $N = 13$ .	Сосудистая нейрохирургия
Sullivan и соавт. 2018 [106]	Клинический случай, $N = 1$	Сосудистая нейрохирургия
Wang и соавт. 2018 [115]	Серия случаев, $N = 13$	Сосудистая нейрохирургия
Dong и соавт. 2018 [30]	Случай–контроль, $N = 14$	Сосудистая нейрохирургия
Shah и соавт. 2017 [100]	Серия случаев, $N = 6$	Сосудистая нейрохирургия
Govsa и соавт. 2017 [39]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Lan и соавт. 2016 [62]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Konno и соавт. 2016 [60]	Серия случаев, $N = 16$	Сосудистая нейрохирургия
Conti и соавт. 2016 [24]	Серия случаев, $N = 10$	Сосудистая нейрохирургия
Anderson и соавт. 2015 [5]	Серия случаев, $N = 10$	Сосудистая нейрохирургия.
Namba и соавт. 2015 [86]	Серия случаев, $N = 10$	Сосудистая нейрохирургия
Chivukula и соавт. 2018 [20]	Серия случаев, $N = 6$	Сосудистая нейрохирургия
Kaneko и соавт. 2017 [55]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Thawani и соавт. 2016 [110]	Клинический случай, $N = 1$	Сосудистая нейрохирургия
Miller и соавт. 2018 [77]	Клинический случай, $N = 1$	Детская нейрохирургия
Eisenmenger и соавт. 2017 [31]	Клинический случай, $N = 1$	Общая нейрохирургия
Jiménez Ormabera и соавт. 2017 [52]	Серия случаев, $N = 4$	Детская нейрохирургия
Wiedermann и соавт. 2017 [127]	Клинический случай, $N = 1$	Детская нейрохирургия
De La Peña и соавт. 2018 [27]	Серия случаев, $N = 2$	Общая нейрохирургия
Cheng и соавт. 2018 [19]	Серия случаев, $N = 10$	Общая нейрохирургия
Panesar и соавт. 2018 [92]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Chen и соавт. 2017 [18]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Abdel Hay и соавт. 2017 [2]	Серия случаев, $N = 2$	Общая нейрохирургия
Mohammad и соавт. 2019 [81]	Клинический случай, $N = 1$	Общая нейрохирургия

Окончание табл. 1

Исследование	Дизайн исследования	Область применения
Cho и соавт. 2015 [21]	Серия случаев, $N = 3$	Общая нейрохирургия
Jardini и соавт. 2014 [50]	Клинический случай, $N = 1$	Общая нейрохирургия
Ahmed и соавт. 2017 [3]	Серия случаев, $N = 5$	Общая нейрохирургия
Kondo и соавт. 2016 [59]	Серия случаев, $N = 4$ .	Нейроонкология
Konakondla и соавт. 2014 [58]	Описание методики	Нейроонкология
Gargiulo и соавт. 2017 [35]	Клинический случай, $N = 1$	Нейроонкология
Thawani и соавт. 2017 [111]	Серия случаев, $N = 3$	Нейроонкология
Brandmeir и соавт. 2016 [14]	Серия случаев, $N = 5$	Нейроонкология
Gao и соавт. 2016 [34]	Когортное исследование, $N = 44$	Спинальная нейрохирургия
Goel и соавт. 2016 [38]	Серия случаев, $N = 11$	Спинальная нейрохирургия
Yin и соавт. 2015 [132]	Серия случаев, $N = 10$	Спинальная нейрохирургия
Yin и соавт. 2015 [132]	Серия случаев, $N = 10$	Спинальная нейрохирургия
Racione и соавт. 2016 [90]	Клинический случай, $N = 1$	Спинальная нейрохирургия
Grau и соавт. 2017 [41]	Клинический случай, $N = 1$	Нейроонкология
Coelho и соавт. 2017 [23]	Клинический случай, $N = 1$	Детская нейрохирургия
Ding и соавт. 2017 [29]	Описание методики	Функциональная нейрохирургия
Naftulin и соавт. 2015 [85]	Описание методики	Функциональная нейрохирургия
van de Belt и соавт. 2018 [114]	Серия случаев, $N = 11$	Нейроонкология

Таблица 2

Общая характеристика исследований, включенных в раздел «Обучение и хирургический тренинг» General characteristics of studies included in the section “Education and surgical training”		
Исследование	Дизайн исследования	Область применения
Mashiko и соавт. 2015 [74]	Случай–контроль, $N = 20$	Сосудистая нейрохирургия
Mashiko и соавт. 2015 [73]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Wang и соавт. 2018 [116]	Серия случаев, $N = 8$	Сосудистая нейрохирургия
Okonogi и соавт. 2017 [89]	Серия случаев, $N = 51$	Сосудистая нейрохирургия, нейроонкология

Продолжение табл. 2

Исследование	Дизайн исследования	Область применения
Lan и соавт. 2016 [61]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Ryan и соавт. 2016 [98]	Серия случаев, $N = 14$	Сосудистая нейрохирургия
Wurm и соавт. 2011 [128]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Benet и соавт. 2015 [9]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Liu и соавт. 2017 [71]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Wang и соавт. 2017 [117]	Серия случаев, $N = 14$	Сосудистая нейрохирургия
Mashiko и соавт. 2016 [73]	Серия случаев, $N = 6$	Сосудистая нейрохирургия
Weinstock и соавт. 2015 [124]	Описание методики	Сосудистая нейрохирургия
Tan и соавт. 2015 [108]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Wanibuchi и соавт. 2016 [119]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Waran и соавт. 2014 [123]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Lin и соавт. 2018 [69]	Случай–контроль, $N = 42$	Нейроонкология
Oishi и соавт. 2013 [88]	Случай–контроль, $N = 23$	Нейроонкология
Muelleman и соавт. 2015 [84]	Серия случаев, $N = 3$	Нейроонкология
Ploch и соавт. 2016 [95]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Spottiswoode и соавт. 2013 [104]	Серия случаев, $N = 2$	Нейроонкология
Lin и соавт. 2018 [68]	Серия случаев, $N = 3$	Нейроонкология
Zheng и соавт. 2018 [135]	Серия случаев, $N = 13$	Общая нейрохирургия
Shah и соавт. 2016 [101]	Случай–контроль, $N = 8$	Общая нейрохирургия
Narayanan и соавт. 2015 [87]	Серия случаев, $N = 15$	Общая нейрохирургия
Inoue и соавт. 2013 [49]	Случай–контроль, $N = 43$	Общая нейрохирургия
Waran и соавт. 2012 [122]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Huang и соавт. 2019 [47]	Случай–контроль, $N = 20$	Нейроонкология
Bova и соавт. 2013 [12]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Hao и соавт. 2018 [43]	Описание методики	Спинальная нейрохирургия
Zhang и соавт. 2019 [133]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Rashim и соавт. 2018 [96]	Серия случаев, $N = 13$	Спинальная нейрохирургия
Girod и соавт. 2017 [37]	Клинический случай, $N = 1$	Спинальная нейрохирургия
Lau и соавт. 2016 [63]	Описание методики	Спинальная нейрохирургия
Li и соавт. 2015 [65]	Рандомизированное контролируемое исследование, $N = 120$	Спинальная нейрохирургия

Окончание табл. 2

Исследование	Дизайн исследования	Область применения
Liew и соавт. 2015 [67]	Серия случаев, $N = 12$	Спинальная нейрохирургия
Liew и соавт. 2015 [67]	Серия случаев, $N = 2$	Спинальная нейрохирургия
Govsa и соавт. 2018 [40]	Серия случаев, $N = 10$	Спинальная нейрохирургия
Bartikian и соавт. 2018 [7]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Chen и соавт. 2017 [17]	Рандомизированное контролируемое исследование, $N = 79$	Общая нейрохирургия
Ahmed и соавт. 2016 [3]	Серия случаев, $N = 5$	Общая нейрохирургия
Grillo и соавт. 2018 [42]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Bannon и соавт. 2017 [6]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Ryan и соавт. 2015 [97]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Waran и соавт. 2013 [120]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Waran и соавт. 2014 [121]	Случай–контроль, $N = 15$	Общая нейрохирургия
Bow и соавт. 2018 [13]	Серия случаев, $N = 11$	Общая нейрохирургия
Weinstock и соавт. 2017 [125]	Случай–контроль, $N = 17$	Детская нейрохирургия
Tai и соавт. 2015 [107]	Описание методики	Общая нейрохирургия
Dayan и соавт. 2016 [26]	Описание методики	Функциональная нейрохирургия
Ghizoni и соавт. 2017 [36]	Описание методики	Детская нейрохирургия

Таблица 3

Общая характеристика исследований, включенных в раздел «Изготовление специализированных инструментов и индивидуальных имплантов» General characteristics of the studies included in the section “The manufacture of specialized tools and individual implants”		
Исследование	Дизайн исследования	Область применения
Yang и соавт. 2017 [130]	Описание методики	Нейроонкология
Ju и соавт. 2014 [54]	Описание методики	Нейроонкология
Hirata и соавт. 2014 [45]	Клинический случай, $N = 1$	Функциональная нейрохирургия
Headley и соавт. 2015 [44]	Описание методики	Функциональная нейрохирургия
Chen и соавт. 2018 [16]	Случай–контроль, $N = 42$	Функциональная нейрохирургия

Окончание табл. 3

Исследование	Дизайн исследования	Область применения
Troebinger и соавт. 2014 [113]	Описание методики	Функциональная нейрохирургия
Sugawara и соавт. 2013 [105]	Клинический случай, $N = 1$	Спинальная нейрохирургия
Choy и соавт. 2017 [22]	Клинический случай, $N = 1$	Спинальная нейрохирургия
Mobbs и соавт. 2018 [79]	Клинический случай, $N = 1$	Спинальная нейрохирургия
Kim и соавт. 2017 [56]	Клинический случай, $N = 1$	Спинальная нейрохирургия
Mobbs и соавт. 2018 [80]	Клинический случай, $N = 1$	Спинальная нейрохирургия
Amelot и соавт. 2018 [4]	Серия случаев, $N = 6$	Спинальная нейрохирургия
Kim и соавт. 2017 [57]	Описание методики	Спинальная нейрохирургия
Mobbs и соавт. 2017 [41]	Клинический случай, $N = 2$	Спинальная нейрохирургия
Liu и соавт. 2018 [70]	Серия случаев, $N = 2$	Спинальная нейрохирургия
Pakzaban и соавт. 2018 [91]	Серия случаев, $N = 43$	Спинальная нейрохирургия
Bohl и соавт. 2018 [10]	Клинический случай, $N = 1$	Общая нейрохирургия
Bolleboom и соавт. 2018 [11]	Описание методики	Хирургия периферических нервов

Таблица 4

Общая характеристика исследований, включенных в раздел «Изготовление биологических имплантов» General characteristics of the studies included in the section “The manufacture of biological implants”		
Исследование	Дизайн исследования	Область применения
Whatley и соавт. 2011 [126]	Фундаментальное исследование	Спинальная хирургия
Li и соавт. 2018 [64]	Фундаментальное исследование	Хирургия периферических нервов
Wang и соавт. 2018 [118]	Фундаментальное исследование	Нейроонкология
Dai и соавт. 2016 [25]	Фундаментальное исследование	Нейроонкология
Zhang и соавт. 2018 [134]	Фундаментальное исследование	Хирургия периферических нервов
Johnson и соавт. 2015 [53]	Фундаментальное исследование	Хирургия периферических нервов
Hu и соавт. 2016 [46]	Фундаментальное исследование	Хирургия периферических нервов

структуры можно использовать технологию печати объемного образования в виде сетчатой структуры [59]. Существует способ, объединяющий результаты проведенной перед операцией трактографии, результаты МРТ и МСКТ для создания трехмерной модели области поражения при опухолях головного мозга [35, 58, 111]. Это способствует прецизионному определению объема поражения и планированию области оперативного вмешательства. Имеются сообщения об использовании трехмерной печати для создания специализированного приспособления, позволяющего определить траекторию и доступ для проведения лазерной абляции опухолей головного мозга [14].

Также 3D-моделирование используется для проектирования оперативного лечения сложных случаев коррекции комплексной деформации основания черепа и краниовертебрального перехода [34, 38, 90, 132].

Имеется опыт планирования операций по устранению ликвореи при пролактиноме [41]. Эта технология позволяет рассчитать расположение предполагаемого доступа. 3D-модели применялись при подготовке хирургического лечения для коррекции менингоэнцефалоцеле у ребенка. Исследования показывают, что это позволяет детально продумать предстоящее оперативное вмешательство и снизить риски развития осложнений [23].

При лечении лекарственно-устойчивой эпилепсии регулярно используется метод установки внутрочерепных электродов. Решение о их имплантации принимается благодаря четкому знанию анатомии и пространственных взаимоотношений [29]. Этот процесс призвана облегчить технология, предложенная Naftulin et al. В своем исследовании авторы предложили использовать 3D-модель для предоперационного планирования и установки электродов в репетиционных целях [85].

Технология 3D-моделирования и печати активно используется не только для разработки плана оперативного вмешательства, но и для наглядной демонстрации пациенту локализации и размера патологического образования. Van de Belt et al. описывают вариант применения данной методики для информирования

об имеющейся у пациента патологии и совместного выбора тактики лечения при глиомах головного мозга [114]. Этот метод позволяет максимально наглядно продемонстрировать заболевание и объяснить вид и характер намеченного оперативного или консервативного лечения.

**Обучение и хирургический тренинг.** Благодаря потенциалу 3D-печати на сегодняшний день имеется возможность придерживаться современных принципов симуляционного обучения в нейрохирургии. Это подразумевает отработку навыков и развитие хирургической техники на искусственных моделях, а не на пациенте, как это было принято ранее [102], что позволяет избежать осложнений, связанных с неопытностью и волнением молодого хирурга. Метод изготовления 3D-моделей способствует максимально точной разработке тренировочного макета для начинающих специалистов, что позволяет приблизить отработку нейрохирургических навыков к условиям реальной операции без риска для пациента.

На сегодняшний день внедрено большое количество анатомически точных моделей черепа, мозгового вещества и краниальных сосудов, используемых для приобретения практического опыта в сосудистой нейрохирургии. Наиболее значимыми работами отметились Mashiko et al., продемонстрировавшие возможность изготовления индивидуальных эластичных моделей аневризм виллизиевого круга, а также модель, позволяющую имитировать условия работы с головным мозгом при операциях на мозговых сосудах [74, 75]. Подобные разработки выполнены и другими авторами [61, 89, 98, 116]. Ряд схожих исследований показали целесообразность применения 3D-моделей для совершенствования навыков сосудистой нейрохирургии [9, 30, 71, 73, 115, 117, 124, 128]. Имеются варианты использования напечатанных моделей для улучшения практических навыков путем их совмещения с кадаверным материалом [108].

Задачи использования 3D-моделей для проведения нейроонкологического тренинга схожи с уже описанными задачами для cerebrovascular хирургии [119]. Специфической

особенностью является разница в структурной организации различных видов объемных образований. С этой задачей позволяет справиться разнообразие используемых для 3D-печати материалов [123]. Данная технология также способствует применению недорогих, но при этом достаточно надежных фантомов для отработки навыков хирургического доступа при удалении опухолей головного мозга. Исследование, в котором трехмерные фантомы были использованы для изучения особенностей менингиом в проекции турецкого седла, сравнило две группы (студентов, изучающих особенности анатомии данной патологии на 2D-изображениях, и студентов, изучающих 3D-модели). Отмечено, что использование 3D-моделей позволяет лучше ориентироваться в пространственной топографии и значительно повысить результативность обучения [69]. Изготовление индивидуального прототипа позволяет провести тренировочное вмешательство перед операцией на человеке [84, 88, 95]. Четкое понимание локализации опухоли, отграничение здоровой ткани от патологически измененной и отработка планируемого доступа до операции способствует детальной проработке предстоящего оперативного вмешательства и сокращению его продолжительности [68, 104]. Еще одной областью активного применения технологии трехмерной печати в симуляционной подготовке нейрохирургов является трансназальная хирургия основания черепа и в частности опухолей гипофиза [87, 101, 135]. Хирургические модели создаются для освоения и оценки навыков эндоскопической хирургии [47, 49, 122].

В спинальной хирургии технология 3D-печати также используется для подготовки практических навыков. Vova et al. разработали способ нейрохирургического тренинга, в котором физическая модель посредством специально разработанного программного обеспечения имитирует интраоперационную нейровизуализацию. Движения инструментов проецируются на экран, что позволяет воссоздать условия работы в операционной [12]. Развитие технологии 3D-печати дает возможность оптимально подобрать материал для из-

готовления модели, смоделировать ее структуру и придать ей анатомически точную форму для максимальной имитации условий работы в операционной [37, 43, 96, 133]. Lau et al. разработали технологию создания модели для обучения и отработки манипуляций выполнения дуротомии [63]. На начальной стадии обучения достаточно сложно интерпретировать результаты нейровизуализационных исследований. В этой ситуации помогает использование в обучающих программах для студентов и ординаторов объемных моделей для ознакомления с трехмерной анатомией и обучение диагностике повреждений позвоночника. Li et al. исследовали подобный метод обучения на студентах медицинского университета, результатом которого стало более глубокое понимание анатомии у студентов, занимающихся с использованием 3D-моделей [65]. Аналогичные данные были достигнуты при использовании трехмерных моделей для диагностики патологии хирургами-ординаторами. Большинство респондентов отметили, что диагноз было проще поставить, используя физическую модель участка позвоночника пациента, а не инструментальные данные [40, 67].

Одним из вариантов применения технологии трехмерной печати является производство моделей костей черепа с целью обучения [3, 7, 17]. Благодаря высокой точности оцифровки и воспроизведения прототипы становятся максимально схожими с реальными образцами. Описан опыт создания анатомически точных фантомов головы пациента с имитацией как костей черепа, так и твердой мозговой оболочки и ткани головного мозга [42]. Одной из структур, смоделированных при помощи технологии 3D-печати, является подвисочная ямка черепа. Эта модель позволила упростить изучение анатомических особенностей данной структуры [6].

3D-модели также нашли свое место в симуляционном тренинге при отработке навыков вентрикулостомии [12, 13, 97, 107, 120, 121, 125]. Тренажер состоит из многоцветной части в виде черепа и сменных внутренних частей, на которых и производят имитацию оперативного вмешательства. Некоторые из этих

прототипов обладают способностью моделирования внутрижелудочкового давления, которая позволяет создать условия работы при различных патологиях ликворопроводящей системы [97, 121]. Vova et al. разработали фантом, позволяющий воссоздать условия работы под УЗИ-навигацией [12]. Описано изготовление специализированного тренажера для отработки навыков фетоскопической хирургической коррекции миеломенингоцеле [77]. Dayan et al. показали опыт применения искусственных голов, изготовленных на 3D-принтере, которые применялись для тренинга неинвазивной нейростимуляции [26]. Ghizoni et al. представили пример изготовления тренажера для имитации проведения хирургической коррекции краниосиноустов у детей. Данная модель отличалась не только высокой точностью передачи особенностей строения детского черепа с подобной патологией, но и невысокой ценой — до 100 \$ [36].

**Изготовление специализированных инструментов и индивидуальных имплантов.** Технологию трехмерной печати можно использовать для изготовления индивидуальных устройств. Одно из таких приспособлений в своей работе представили Yang et al. [130]. В исследовании отражено применение 3D-принтеров для создания индивидуально подходящих протезов удаленной мозговой ткани после резекции глиобластомы. В данный имплант интегрировали онколитический вирус, уничтожающий оставшиеся опухолевые клетки путем индукции апоптоза. Имеется опыт применения технологии 3D-моделирования для создания индивидуальных компенсаторов, используемых для защиты окружающей здоровой ткани в случае применения протоновой терапии при лечении опухолей головного мозга [54].

При установке специализированных имплантов на поверхность коры головного мозга используются пластины со стандартным расположением электродов, которые не всегда подходят для конкретного пациента. В целях индивидуализации этих устройств предложена технология печати с учетом специфического строения целевых зон стимуляции [44, 45].

Кроме этого, существует исследование, описывающее изготовление специализированного кольца, фиксирующего электроды для глубокой стимуляции головного мозга [16].

Использование индивидуального регистрирующего прибора значительно повышает точность при магнитоэнцефалографии. Данный диагностический метод способствует регистрации магнитной активности головного мозга человека. Использование индивидуального печатного шлема позволяет четко позиционировать улавливающий прибор и сокращает вероятность движения головы при исследовании. Указанная технология повышает качество выполнения данного вида исследования [113].

Использование транспедикулярных стабилизирующих систем требует от хирурга максимальной точности и может быть связано с повреждением близлежащих невральных структур при неправильном позиционировании винта в ножке позвонка. Во избежание таких осложнений, Sugawara et al. продемонстрировали направляющие пластины для дополнительной фиксации и направления металлоконструкции при ее имплантации. Данные пластины изготавливались индивидуально для каждого пациента и значительно облегчали процесс установки винтов, увеличивая точность до 1 мм [105]. В литературе описаны случаи разработки протезов позвонков и целых участков позвоночника как поясничного [4, 22, 57, 79, 80], так и шейного [78] отделов на основе нейровизуализационных данных пациента. Kim et al. в своей работе описали случай имплантации напечатанного протеза крестцового отдела позвоночника пациенту после гемисакрэктомии [56]. Liu et al. разработали и апробировали методику пластики манжеты нервного корешка 3D-протезом твердой мозговой оболочки при лечении сакральных кист с вовлечением в процесс зоны отхождения корешка от спинного мозга [70]. Pakzaban разработал и протестировал систему, позволяющую размечать место оперативного вмешательства при микрохирургических операциях на поясничном отделе позвоночника для позиционирования операционного разреза. 3D-проект данного устройства находится в открытом доступе в Интернете [91].

Описан вариант использования 3D-печати для изготовления специальных неферромагнитных ранорасширителей, используемых для проведения шунтирования желудочков головного мозга без помех для визуализации электромагнитной навигационной системы [10]. На 3D-принтере также можно изготовить приспособления, предотвращающие возникновение травматических невром, как показали в своем исследовании Bolleboom et al. [11].

**Изготовление биологических имплантов.** На сегодняшний день ведутся активные разработки в лечении дегенеративных заболеваний межпозвоночных дисков при помощи технологии регенерации тканей. Это позволило бы заменить имеющиеся методы: ригидная стабилизация пораженного сегмента и замена дегенерированного диска искусственным имплантом. Для осуществления интеграции клеток предполагается использование эластического каркаса, в создании которого и используется 3D-печать [126]. Данная технология пока не была внедрена в спинальную хирургию и требует проведения дополнительных исследований перед ее использованием в клинической практике. Имеется опыт применения технологии 3D-печати для изготовления альгинат-желатинового гидрогеля как питательной среды для культивации шванновских клеток [64]. Wang et al. предложили вариант изготовления биологической модели глиобластомы человека для изучения процессов васкуляризации опухоли *in vivo* [118]. Указанная модель отличается достаточной достоверностью тканевых структур для проведения лабораторных исследований. Одной из возможностей трехмерной печати на данный момент является создание живых тканей из клеток. Так, Dai et al. создали образцы опухолевой ткани глиомы головного мозга для тестирования лекарственной активности препаратов при химиотерапии [25].

В хирургии периферических нервов не первый год разрабатываются биологические импланты, позволяющие протезировать поврежденный участок периферической нервной ткани. Zhang et al. внедрили технологию, осно-

ванную на трехмерной печати, способную изготавливать пластический материал из мезенхимальных стволовых клеток человека [134]. В исследованиях на крысах данные модели показали хорошие результаты в лечении дефектов лицевого нерва [53]. Этот эксперимент позволяет предположить наличие возможности применения данной технологии на людях. Комбинация синтетической основы и стволовых клеток соединительной ткани для восстановления дефектов периферических нервов на сегодняшний день уже активно используется [46].

### Обсуждение

3D-печать обещает осуществить такой же прорыв, как и новая промышленная революция. Если компьютеры и Интернет обеспечили широкое распространение знаний, то 3D-принтеры позволяют материализовать инновационные идеи с потенциально огромными экономическими, социальными и политическими последствиями [76]. Кроме того, с использованием этой технологии новые продукты теперь могут быть изготовлены за очень короткое время. Хотя 3D-печать внедрена в промышленность около десяти лет назад, именно благодаря недавнему снижению затрат и повышению доступности она вызвала растущий интерес в различных областях, включая медицину. Идея, лежащая в основе применения трехмерной печати в медицинских целях, — это возможность легко и надежно интерпретировать нормальную и патологическую анатомию с помощью понятной, персонализированной модели пациента. При пластической реконструкции объекта создание ментального объемного изображения патологии пациента требует гораздо меньших усилий. Оптимизированная и недорогая 3D-печать позволяет удерживать объекты нашего внимания одновременно и в руке, и в уме. Создание виртуальных образцов позволяет быстро превращать любую инновационную идею в реальный объект. Это имеет огромный потенциал для медицинского применения, в том числе дает возможность любому

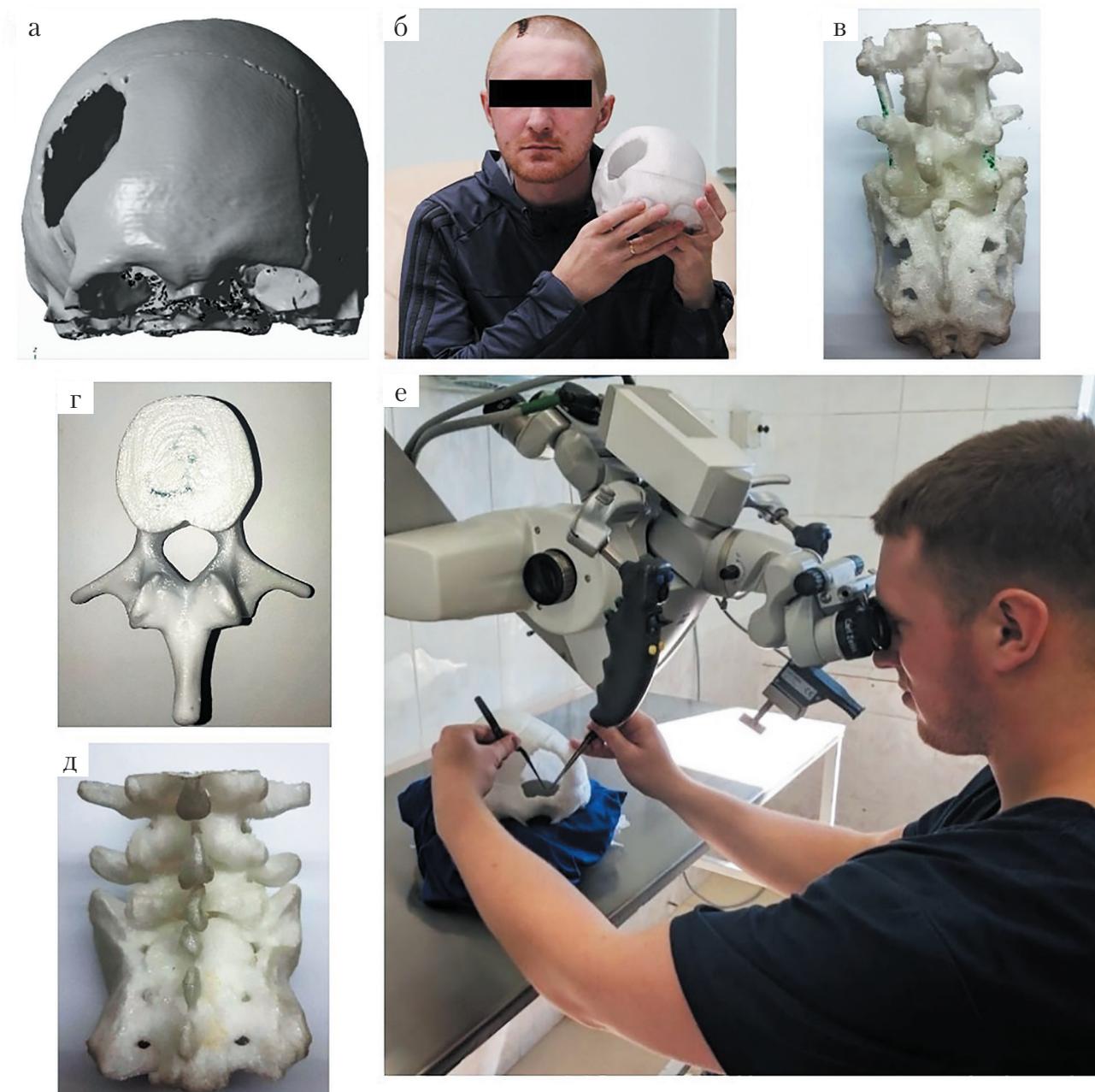


Рис. 3. Применение технологии 3D-печати в нейрохирургии. Консультирование пациента и объяснение хода оперативного вмешательства — краниопластики (а), (б). Моделирование состояния после оперативного лечения — транспедикулярной фиксации на уровнях  $L_{IV}$ – $L_V$ – $S_1$  (в). Трехмерная печать отдельного позвонка (г) и пояснично-крестцового отдела для использования в обучении анатомии студентов и ординаторов (д). Применение 3D-печатных моделей для тренировки микрохирургических навыков (е)

Fig. 3. Application of 3D printing technology in neurosurgery. Patient counseling and explanation of the course of surgery — cranioplasty (a), (б). Modeling of the condition after surgical treatment — transpedicular fixation at  $L_{IV}$ – $L_V$ – $S_1$  levels (в). Three-dimensional printing of a separate vertebra (г) and lumbosacral for use in teaching anatomy of students and residents (д). The use of 3D-printed models for training microsurgical skills (е)

хирургу реализовать свои собственные инструменты.

В настоящем систематическом обзоре рассмотрены основные области применения 3D-печати в нейрохирургии, включая создание понятных, персонализированных моделей индивидуальной анатомии пациента, консультирование, обучение и хирургический тренинг, а также печать базовых индивидуальных протезов и имплантируемых медицинских устройств (рис. 3).

Объем трехмерной печати при оказании специализированной нейрохирургической помощи за последние два десятилетия значительно вырос. Но, несмотря на значительный прогресс, мы обнаружили, что использование 3D-печати для формирования структур мягких тканей в значительной степени не изучено. Осуществлено крайне мало попыток зафиксировать механические свойства таких элементов в виде трехмерных моделей. В области нейрохирургии необходимо использовать комбинацию твердых и мягких материалов, чтобы точно моделировать костные элементы, а также подлежащие ткани. Перспективным направлением развития технологии 3D-печати является моделирование анатомических структур различной упругости и плотности с использованием гидрогелевых материалов, которые имитируют различные механические свойства *in vivo* и широко используются в тканевой инженерии, но эти методы пока не применяются для изготовления анатомических моделей [32, 83]. Мы полагаем, что с будущими разработками печатных материалов и достижениями в области программного обеспечения для 3D-печати следующее поколение хирургических симуляций будет обладать дополнительным реализмом, который значительно улучшит хирургическое обучение и предоперационное планирование, что приведет к увеличению показателей успешности хирургических операций.

Тем не менее для того чтобы сделать 3D-принтеры доступными и привлекательными для нейрохирургов, необходимо преодолеть ряд ограничений этой технологии. Длительное

время, необходимое для построения трехмерных нейроанатомических моделей, демонстрирует очевидное ограничение использования этих моделей в чувствительных ко времени ситуациях, таких как внутримозговые кровоизлияния или дислокационный синдром [61, 110]. В настоящее время ведутся разработки, направленные на повышение скорости печати, снижение стоимости 3D-принтеров и печатных материалов, использование материалов с новыми физико-химическими свойствами, а также повышение точности как для оборудования 3D-печати, так и для программного обеспечения [33].

### Ограничения исследования

Выводы настоящей работы необходимо рассматривать с учетом ограничений самих исследований, включенных в систематический обзор. В большинстве публикаций участвовало 10 или менее участников, в связи с чем результаты обладают недостаточной статистической мощностью. Кроме того, большинство работ являлись описанием клинического случая или серии случаев либо раскрывали технику изготовления печатной модели. Такие исследования, несомненно, полезны для оценки приемлемости 3D-моделей в хирургическом сообществе, но не дают высокого уровня доказательств эффективности их применения. Также ограничением являлась гетерогенность дизайна, из-за которого отсутствовала согласованность в измеряемых результатах. Это во многих случаях не позволило провести значимое прямое сравнение и статистическое объединение данных для метаанализа. В частности в отношении работ, связанных с обучением, многие не анализировали знания учащихся до использования моделей, что могло повлиять на результаты после обучения.

### Выводы

3D-печать является анатомически точным методом, который позволяет изготавливать модели для конкретных пациентов в целях хирургического планирования и консультирова-

ния, отработки практических навыков и обучения, создания специализированных приспособлений и биосовместимых имплантов. Исследователи в различных научных направлениях работают совместно, чтобы улучшить эту технологию и ее использование в ускоренном темпе, постоянно появляются новые модели, методы и материалы.

Трехмерная печать может стать рутинной в клиническом использовании, поскольку ограничения этой технологии продолжают преодолеваются. Тем не менее печатным моделям всё еще не хватает функций, которые делают их реалистичными, таких как текстура, плотность, упругость и гемодинамические факторы.

Требуются дополнительные качественные данные, чтобы продемонстрировать, насколько 3D-печать эффективна в различных областях нейрохирургии. Для этого необходимо проведение исследований, направленных на разработку новых способов применения данной технологии и оценивающих эффективность ее использования в неврологической хирургии.

Вадим Анатольевич Бывальцев, д. м. н., профессор, зам. директора по инновационной и международной деятельности Иркутского научного центра хирургии и травматологии,

Почетный профессор Казахского национального центра нейрохирургии, главный нейрохирург Дирекции здравоохранения ОАО «РЖД», руководитель

Центра нейрохирургии Дорожной клинической больницы на ст. «Иркутск-Пассажирский» ОАО «РЖД-Медицина»,

заведующий кафедрой нейрохирургии и инновационной медицины Иркутского государственного медицинского университета,

заведующий научно-клиническим отделом нейрохирургии Иркутского научного центра хирургии и травматологии, профессор кафедры травматологии, ортопедии

и нейрохирургии Иркутской государственной медицинской академии последипломного образования, ведущий научный сотрудник

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера  
e-mail: byval75vadim@yandex.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. *Аддитивные технологии в нейрохирургии* / А.Д. Кравчук, А.А. Потанов, В.Ю. Панченко и др. // *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. – 2018. – №82 (6). – С. 97–104. DOI: 10.17116/neiro20188206197.

1. *Kravchuk A.D., Potapov A.A., Panchenko V.J., Komlev V.S., Novikov M.M., Ohlopkov V.A., Marjahn A.D., Duvidzon V.G., Latyshev J.A., Chelushkin D.M., Chobulov S.A., Aleksandrov A.P., Shkarubo A.N.* Additive technologies in neurosurgery. *Journal of Neurosurgery Issues Im. N.N. Burdenko*. 2018. N 82 (6). P. 97–104. DOI: 10.17116/neiro20188206197. In Russian.

2. *Abdel Hay J., Smayra T., Moussa R.* Customized Polymethylmethacrylate Cranioplasty Implants Using 3-Dimensional Printed Poly(lactic Acid) Molds: Technical Note with 2 Illustrative Cases. *World Neurosurgery*. 2017. Vol. 105. P. 971–979. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.05.007.

3. *Ahmed S., VanKoeveering K.K., Kline S., Green G.E., Arts H.A.* Middle cranial fossa approach to repair tegmen defects assisted by three-dimensionally printed temporal bone models. *Laryngoscope*. 2017. Vol. 127, N 10. P. 2347–2351. DOI: 10.1002/lary.26438.

4. *Amelot A., Colman M., Loret J.E.* Vertebral body replacement using patient-specific three-dimensional-printed polymer implants in cervical spondylotic myelopathy: an encouraging preliminary report. *The Spine Journal*. 2018. Vol. 18, N 5. P. 892–899. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.01.019.

5. *Anderson J.R., Thompson W.L., Alkattan A.K., Diaz O., Klucznik R., Zhang Y.J., Britz G.W., Grossman R.G., Karmonik C.* Three-dimensional printing of anatomically accurate, patient specific intracranial aneurysm models. *Journal of Neurointerventional Surgery*. 2016. Vol. 8, N 5. P. 517–520. DOI: 10.1136/neurintsurg-2015-011686.

6. *Bannon R., Parihar S., Skarparis Y., Varsou O., Cezayirli E.* 3D printing the pterygopalatine fossa: a negative space model of a complex structure. *Surgical and Radiologic Anatomy*. 2017. Vol. 40, N 2. P. 185–191.

7. *Bartikian M., Ferreira A., Gonçalves-Ferreira A., Neto L.L.* 3D printing anatomical models of head bones. *Surgical and Radiologic Anatomy*. 2019. Vol. 41, N 10. P. 1205–1209. DOI: 10.1007/s00276-018-2148-4.

8. *Baskaran V., Štrkalj G., Štrkalj M., Di Ieva A.* Current Applications and Future Perspectives of the Use of 3D Printing in Anatomical Training and Neurosurgery. *Frontiers in Neuroanatomy*. 2016. Vol. 10. P. 69. DOI: 10.3389/fnana.2016.00069.

9. Benet A., Plata-Bello J., Abila A.A., Acevedo-Bolton G., Saloner D. Implantation of 3D-Printed Patient-Specific Aneurysm Models into Cadaveric Specimens: A New Training Paradigm to Allow for Improvements in Cerebrovascular Surgery and Research. *BioMed Research International*. 2015. Vol. 2015. P. 1–9. DOI: 10.1155/2015/939387.

10. Bohl M.A., Xu D.S., Cavallo C., Paisan G.M., Smith K.A., Nakaji P. The Barrow Innovation Center Case Series: A Novel 3-Dimensional-Printed Retractor for Use with Electromagnetic Neuronavigation Systems. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 116. P. 1075–1078. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.05.167.

11. Bolleboom A., de Ruiter G.C. W., Coert J.H., Tuk B., Holstege J.C., van Neck J.W. Novel experimental surgical strategy to prevent traumatic neuroma formation by combining a 3D-printed Y-tube with an autograft. *Journal of Neurosurgery*. 2018. Vol. 130, N 1. P. 1–336. DOI: 10.3171/2017.8.JNS17276.

12. Bova F.J., Rajon D.A., Friedman W.A., Murad G.J., Hoh D.J., Jacob R.P. Mixedreality simulation for neurosurgical procedures. *Neurosurgery*. 2013. Vol. 73, N 1. P. 138–145.

13. Bow H., He L., Raees M.A., Pruthi S., Chitale R. Development and Implementation of an Inexpensive, Easily Producing, Time Efficient External Ventricular Drain Simulator Using 3-Dimensional Printing and Image Registration. *Operative Neurosurgery*. 2018. Vol. 16, N 4. P. 496–502. DOI: 10.1093/ons/opy142.

14. Brandmeir N.J., McInerney J., Zacharia B.E. The use of custom 3D printed stereotactic frames for laser interstitial thermal ablation: technical note. *Neurosurgical Focus*. 2016. Vol. 41, N 4. P. E3.

15. Carpenter R.D., Brett S.K., Torstrick F.B., Foley K.T., Burkus J.K., Christopher S.D., Ken G., Guldborg R., Safranski D.L. Effect of porous orthopaedic implant material and structure on load sharing with simulated bone ingrowth: A finite element analysis comparing titanium and PEEK. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018. Vol. 80. P. 68–76. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616118300213?via%3Dihub> (date of access 20.11.2019).

16. Chen J., Li N., He D., Wu M., Long H., Yang K., Qi S., Zhang W., Wang J. 3-D printing for constructing the burr hole ring of lead fixation device in deep brain stimulation. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2018. Vol. 58. P. 229–233. DOI: 10.1016/j.jocn.2018.10.086.

17. Chen S., Pan Z., Wu Y. The role of three-dimensional printed models of skull in anatomy education: a randomized controlled trial. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, N 1. P. 575. DOI: 10.1038/s41598-017-00647-1.

18. Chen Y.W., Shih C.T., Cheng C.Y., Lin Y.C. The Development of Skull Prosthesis through Active Contour Model. *Journal of Medical Systems*. 2017. Vol. 41, N 10. P. 164. DOI: 10.1007/s10916-017-0808-2.

19. Cheng C.H., Chuang H.Y., Lin H.L., Liu C.L., Yao C.H. Surgical results of cranioplasty using three-dimensional printing technology. *Clinical Neurology and Neurosurgery*. 2018. Vol. 168. P. 118–123. DOI: 10.1016/j.clineuro.2018.03.004.

20. Chivukula V.K., Levitt M.R., Clark A., Barbour M.C., Sansom K., Johnson L., Kelly C.M., Geindreau C., Rolland du Roscoat S., Kim L.J., Aliseda A. Reconstructing patient-specific cerebral aneurysm vasculature for *in vitro* investigations and treatment efficacy assessments. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2019. Vol. 61. P. 153–159. DOI: 10.1016/j.jocn.2018.10.103.

21. Cho H.R., Roh T.S., Shim K.W., Kim Y.O., Lew D.H., Yun I.S. Skull Reconstruction with Custom Made Three-Dimensional Titanium Implant. *Archives of Craniofacial Surgery*. 2015. Vol. 16, N 1. P. 11–16. DOI: 10.7181/acfs.2015.16.1.11.

22. Choy W.J., Mobbs R.J., Wilcox B., Phan S., Phan K., Sutterlin C.E. 3rd. Reconstruction of Thoracic Spine Using a Personalized 3D-Printed Vertebral Body in Adolescent with T9 Primary Bone Tumor. *World Neurosurgery*. 2017. Vol. 105. P. 1013–1032. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.05.133.

23. Coelho G., Chaves T.M. F., Goes A.F., Del Massa E.C., Moraes O., Yoshida M. Multimaterial 3D printing preoperative planning for frontoethmoidal meningoencephalocele surgery. *Child's Nervous System*. 2018. Vol. 34, N 4. P. 749–756. DOI: 10.1007/s00381-017-3616-6.

24. Conti A., Pontoriero A., Iatì G. 3D-Printing of Arteriovenous Malformations for Radiosurgical Treatment: Pushing Anatomy Understanding to Real Boundaries. *Cureus*. 2016. Vol. 8, N 4. P. e594. DOI: 10.7759/cureus.594.

25. Dai X., Ma C., Lan Q., Xu T. 3D bioprinted glioma stem cells for brain tumor model and applications of drug susceptibility. *Biofabrication*. 2016. Vol. 8, N 4. P. 045005. DOI: 10.1088/1758-5090/8/4/045005.

26. Dayan E., Thompson R.M., Buch E.R., Cohen L.G. 3D-printed head models for navigated non-invasive brain stimulation. *Clinical Neurophysiology*. 2016. Vol. 127, N 10. P. 33–41.

27. De La Peña A., De La Peña-Brambila J., Pérez-De La Torre J., Ochoa M., Gallardo G.J. Low-cost customized cranioplasty using a 3D digital printing model: a case report. *3D Print Med*. 2018. Vol. 4, N 1. P. 4. DOI: 10.1186/s41205-018-0026-7.

28. Del Castillo-Calcáneo J., Donoghue J.A. A Novel Method for 3-Dimensional Printing a Brain That Feels

and Looks Like One: The Next Step in the Search of the Perfect Neurosurgical Simulator. *World Neurosurgery*. 2016. Vol. 91. P. 620–622. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.03.086.

29. Ding C.Y., Yu L.H., Lin Y.X., Chen F., Wang W.X., Lin Z.Y., Kang D.Z. A novel stereotaxic system for implanting a curved lead to two intracranial targets with high accuracy. *Journal of Neuroscience Methods*. 2017. Vol. 291. P. 190–197. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2017.08.017.

30. Dong M., Chen G., Li J. Three-dimensional brain arteriovenous malformation models for clinical use and resident training. *Medicine (Baltimore)*. 2018. Vol. 97, N 3. P. e9516. DOI: 10.1097/MD.00000000000009516.

31. Eisenmenger L.B., Wiggins R.H. 3rd, Fulst D.W. 3rd, Huo E.J. Application of 3-Dimensional Printing in a Case of Osteogenesis Imperfecta for Patient Education, Anatomic Understanding, Preoperative Planning, and Intraoperative Evaluation. *World Neurosurgery*. 2017. Vol. 107. P. 1–1049. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.08.026.

32. Farina M., Alexander J.F., Thekkedath U., Ferrari M., Grattoni A. Cell encapsulation: Overcoming barriers in cell transplantation in diabetes and beyond. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2018. PII: S0169-409X(18)30080-2. DOI: 10.1016/j.addr.2018.04.018.

33. Ganguli A., Pagan-Diaz G.J., Grant L., Cvetkovic C., Bramlet M., Vozenilek J., Kesavadas T., Bashir R. 3D printing for preoperative planning and surgical training: a review. *Biomedical Microdevices*. 2018. Vol. 20, N 3. P. 65. DOI: 10.1007/s10544-018-0301-9.

34. Gao F., Wang Q., Liu C., Xiong B., Luo T. Individualized 3D printed model-assisted posterior screw fixation for the treatment of craniovertebral junction abnormality: a retrospective study. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2017. Vol. 27, N 1. P. 29–34. DOI: 10.3171/2016.11.SPINE16713.

35. Gargiulo P., Árnadóttir I., Gíslason M., Edmunds K., Ólafsson I. New Directions in 3D Medical Modeling: 3D-Printing Anatomy and Functions in Neurosurgical Planning. *Journal of Healthcare Engineering*. 2017. Vol. 2017. P. 1–8. DOI: 10.1155/2017/1439643.

36. Ghizoni E. 3D-Printed craniosynostosis model: new simulation surgical tool. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 109. P. 356–361. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.10.025.

37. Girod P.P., Hartmann S., Kavakebi P., Obermaier J., Verius M., Thomé C. Asymmetric pedicle subtraction osteotomy (aPSO) guided by a 3D-printed model to correct a combined fixed sagittal and coronal imbalance. *Neurosurgical Review*. 2017. Vol. 40, N 4. P. 689–693. DOI: 10.1007/s10143-017-0882-4.

38. Goel A., Jankharia B., Shah A., Sathe P. Three-dimensional models: an emerging investigational revolution for craniovertebral junction surgery. *Journal of Neurosurgery Spine*. 2016. Vol. 25, N 6. P. 740–744.

39. Govsa F., Karakas A.B., Ozer M.A., Eraslan C. Development of Life-Size Patient-Specific 3D-Printed Dural Venous Models for Preoperative Planning. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 110. P. 141–149. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.10.119.

40. Govsa F., Ozer M.A., Biceroglu H., Karakas A.B., Cagli S., Eraslan C., Alagoz A.K. Creation of 3-Dimensional Life Size: Patient-Specific C1 Fracture Models for Screw Fixation. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 114. P. 173–181. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.02.131.

41. Grau S., Kellermann S., Faust M., Perrech M., Beutner D., Drzezga A., Zöller J. Repair of Cerebrospinal Fluid Leakage Using a Transfrontal, Radial Adipofascial Flap: An Individual Approach Supported by Three-Dimensional Printing for Surgical Planning. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 110. P. 315–318. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.11.083.

42. Grillo F.W., Souza V.H., Matsuda R.H., Rondinoni C., Pavan T.Z., Baffa O., Machado H.R., Carneiro A.A.O. Patient-specific neurosurgical phantom: assessment of visual quality, accuracy, and scaling effects. *3D Print Med*. 2018. Vol. 4, N 1. P. 3. DOI: 10.1186/s41205-018-0025-8.

43. Hao J., Nangunoori R., Wu Y.Y. Material characterization and selection for 3D-printed spine models. *3D Printing in Medicine*. 2018. Vol. 4, N 1. P. 1–8. DOI: 10.1186/s41205-018-0032-9.

44. Headley D.B., DeLucca M.V., Haufler D., Paré D. Incorporating 3D-printing technology in the design of head-caps and electrode drives for recording neurons in multiple brain regions. *Journal Neurophysiology*. 2015. Vol. 113, N 7. P. 2721–2732. DOI: 10.1152/jn.00955.2014.

45. Hirata M., Morris S., Sugata H., Matsushita K., Yanagisawa T., Kishima H., Yoshimine T. Patient-specific contour-fitting sheet electrodes for electrocorticographic brain machine interfaces. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2014. Vol. 2014. P. 5204–5207. DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944798.

46. Hu Y., Wu Y., Gou Z. 3D-engineering of Cellularized Conduits for Peripheral Nerve Regeneration. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 321–384. DOI: 10.1038/srep32184.

47. Huang X., Liu Z., Wang X., Li X.D., Cheng K., Zhou Y., Jiang X.B. A small 3D-printing model of macroadenomas for endoscopic endonasal surgery. *Pituitary*. 2019. Vol. 22, N 1. P. 46–53. DOI: 10.1007/s11102-018-0927-x.

48. Hung B.P., Naved B.A., Nyberg E.L. Three-Dimensional Printing of Bone Extracellular Matrix for Craniofacial Regeneration. *ACS Biomaterials Science Engineering*. 2016. Vol. 2, N 10. P. 1806–1816.

49. Inoue D., Yoshimoto K., Uemura M., Yoshida M., Ohuchida K., Kenmotsu H. Threedimensional highdefinition neuroendoscopic surgery: A controlled comparative laboratory study with twodimensional endoscopy and clinical application. *Journal of Neurological Surgery Part A Central European Neurosurgery*. 2013. Vol. 74, N 3. P. 57–65.

50. Jardini A.L., Larosa M.A., Maciel F.R., Zavgaglia C.A., Bernardes L.F., Lambert C.S., Calderoni D.R., Kharmandayan P. Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing. *Journal of Craniomaxillofacial Surgery*. 2014. Vol. 42, N 8. P. 1877–1884. DOI: 10.1016/j.jcms.2014.07.006.

51. Jianfeng K., Ling W., Chuncheng Y., Lei W., Cao Y., Jiankang H., Dichen L. Custom design and biomechanical analysis of 3D-printed PEEK rib prostheses. *Biomech. Model Mechanobiol*. 2018. Vol. 17, N 4. P. 1083–1092. DOI: 10.1007/s10237-018-1015-x.

52. Jiménez Ormabera B., Díez Valle R., Zaratiegui Fernández J., Llorente Ortega M., Unamuno Iñurritegui X., Tejada Solís S. 3D printing in neurosurgery: a specific model for patients with craniostylosis. *Neurocirugia (Astur)*. 2017. Vol. 28, N 6. P. 260–265. DOI: 10.1016/j.neucir.2017.05.001.

53. Johnson B.N., Lancaster K.Z., Zhen G. 3D Printed Anatomical Nerve Regeneration Pathways. *Advanced Functional Materials*. 2015. Vol. 25, N 39. P. 6205–6217.

54. Ju S.G., Kim M.K., Hong C.S., Kim J.S., Han Y., Choi D.H., Shin D., Lee S.B. New technique for developing a proton range compensator with use of a 3-dimensional printer. *International Journal Radiation Oncology Biology Physics*. 2014. Vol. 88, N 2. P. 453–458. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2013.10.024.

55. Kaneko N., Mashiko T., Namba K., Tateshima S., Watanabe E., Kawai K. A patient-specific intracranial aneurysm model with endothelial lining: a novel in vitro approach to bridge the gap between biology and flow dynamics. *Journal of Neurointerventional Surgery*. 2018. Vol. 10, N 3. P. 306–309. DOI: 10.1136/neurintsurg-2017-013087.

56. Kim D., Lim J.Y., Shim K.W., Han J.W., Yi S., Yoon D.H., Kim K.N., Ha Y., Ji G.Y., Shin D.A. Sacral Reconstruction with a 3D-Printed Implant after Hemisacrectomy in a Patient with Sacral Osteosarcoma: 1-Year Follow-Up Result. *Yonsei Medical Journal*. 2017. Vol. 58, N 2. P. 453–457. DOI: 10.3349/ymj.2017.58.2.453.

57. Kim M.J., Lee S.R., Lee M.Y. Characterization of 3D printing techniques: Toward patient specific quality assurance spine-shaped phantom for stereotactic body radiation therapy. *PLoS One*. 2017. Vol. 12, N 5. P. 176–227. DOI: 10.1371/journal.pone.0176227.

58. Konakondla S., Brimley C.J., Sublett J.M. Multimodality 3D Superposition and Automated Whole Brain Tractography: Comprehensive Printing of the Functional Brain. *Cureus*. 2017. Vol. 9, N 9. P. 17–31. DOI: 10.7759/cureus.1731.

59. Kondo K., Harada N., Masuda H., Sugo N., Terazono S., Okonogi S., Sakaeyama Y., Fuchinoue Y., Ando S., Fukushima D., Nomoto J., Nemoto M. A neurosurgical simulation of skull base tumors using a 3D printed rapid prototyping model containing mesh structures. *Acta Neurochirurgica*. 2016. Vol. 158, N 6. P. 1213–1219. DOI: 10.1007/s00701-016-2781-9.

60. Konno T., Mashiko T., Oguma H., Kaneko N., Otani K., Watanabe E. Rapid 3-Dimensional Models of Cerebral Aneurysm for Emergency Surgical Clipping. *No Shinkei Geka*. 2016. Vol. 44, N 8. P. 651–660. DOI: 10.11477/mf.1436203350.

61. Lan Q., Chen A., Zhang T., Li G., Zhu Q., Fan X., Ma C., Xu T. Development of Three-Dimensional Printed Craniocerebral Models for Simulated Neurosurgery. *World Neurosurgery*. 2016. Vol. 91. P. 434–442. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.04.069.

62. Lan Q., Chen A.L., Zhang T., Zhu Q., Xu T. Preparation of simulate craniocerebral models via three dimensional printing technique. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*. 2016. Vol. 96, N 30. P. 2434–2437. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.30.015.

63. Lau J.C., Denning L., Lownie S.P., Peters T.M., Chen E.C. A Framework for Patient-Specific Spinal Intervention Simulation: Application to Lumbar Spinal Durotomy Repair. *Stud. Health. Technol. Inform.* 2016. Vol. 220. P. 185–192.

64. Li X., Wang X., Wang X., Chen H., Zhang X., Zhou L., Xu T. 3D bioprinted rat Schwann cell-laden structures with shape flexibility and enhanced nerve growth factor expression. *3 Biotech*. 2018. Vol. 8, N 8. P. 34–42. DOI: 10.1007/s13205-018-1341-9.

65. Li Z., Li Z., Xu R., Li M., Li J., Liu Y. Threedimensional printing models improve understanding of spinal fracture — A randomized controlled study in China. *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. P. 115–170.

66. Liberati A., Altman D.G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gotzsche P.C., Ioannidis J.P., Clarke M., Devereaux P.J., Kleijnen J., Moher D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *PLoS Med*. 2009. Vol. 6, N 7. P. 1–34. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.006.

67. Liew Y., Beveridge E., Demetriades A.K., Hughes M.A. 3D printing of patientspecific anatomy: A tool to improve patient consent and enhance imaging interpretation by trainees. *British Journal of Neurosurgery*. 2015. Vol. 29, N 5. P. 712–714.
68. Lin J., Zhou Z., Guan J., Zhu Y., Liu Y., Yang Z., Lin B., Jiang Y., Quan X., Ke Y., Xu T. Using Three-Dimensional Printing to Create Individualized Cranial Nerve Models for Skull Base Tumor Surgery. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 120. P. 142–152. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.07.236.
69. Lin Q.S., Lin Y.X., Wu X.Y., Yao P.S., Chen P., Kang D.Z. Utility of 3-Dimensional-Printed Models in Enhancing the Learning Curve of Surgery of Tuberculum Sellae Meningioma. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 113. P. 222–231. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.01.215.
70. Liu B., Wang Z., Lin G., Zhang J. Radiculoplasty with reconstruction using 3D-printed artificial *dura mater* for the treatment of symptomatic sacral canal cysts: Two case reports. *Medicine*. 2018. Vol. 97, N 49. P. 132–189. DOI: 10.1097/MD.00000000000013289.
71. Liu Y., Gao Q., Du S., Chen Z., Fu J., Chen B., Liu Z., He Y. Fabrication of cerebral aneurysm simulator with a desktop 3D printer. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. DOI: 10.1038/srep44301.
72. Maduri R., Viaroli E., Levivier M., Daniel R.T., Messerer M. Use of a 3D Skull Model to Improve Accuracy in Cranioplasty for Autologous Flap Resorption in a 3-Year-Old Child. *Pediatric Neurosurgery*. 2017. Vol. 52, N 5. P. 351–355. DOI: 10.1159/000479329.
73. Mashiko T., Kaneko N., Konno T., Otani K., Nagayama R., Watanabe E. Training in Cerebral Aneurysm Clipping Using Self-Made 3-Dimensional Models. *Journal of Surgical Education*. 2017. Vol. 74, N 4. P. 681–689. DOI: 10.1016/j.jsurg.2016.12.010.
74. Mashiko T., Otani K., Kawano R., Konno T., Kaneko N., Ito Y. Development of threedimensional hollow elastic model for cerebral aneurysm clipping simulation enabling rapid and low cost prototyping. *World Neurosurgery*. 2015. Vol. 130, N 5. P. 1409–1788.
75. Mashiko T., Konno T., Kaneko N., Watanabe E. Training in Brain Retraction Using a Self-Made Three-Dimensional Model. *World Neurosurgery*. 2015. Vol. 84, N 2. P. 585–590. DOI: 10.1016/j.wneu.2015.03.058.
76. Mertz L. Dream it, design it, print it in 3-D: what can 3-D printing do for you? *IEEE pulse*. 2013. Vol. 4, N 6. P. 15–21.
77. Miller J.L., Ahn E.S., Garcia J.R., Miller G.T., Satin A.J., Baschat A.A. Ultrasound-based three-dimensional printed medical model for multispecialty team surgical rehearsal prior to fetoscopic myelomeningocele repair. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*. 2018. Vol. 51, N 6. P. 836–837. DOI: 10.1002/uog.18891.
78. Mobbs R.J. The utility of 3d printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report. *Journal of Neurosurgery*. 2017. Vol. 26, N 4. P. 411–545.
79. Mobbs R.J., Choy W.J., Wilson P., McEvoy A., Phan K., Parr W.C.H. L5 En-Bloc Vertebrectomy with Customized Reconstructive Implant: Comparison of Patient-Specific Versus Off-the-Shelf Implant. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 112. P. 94–100. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.01.078.
80. Mobbs R.J., Parr W.C. H., Choy W.J., McEvoy A., Walsh W.R., Phan K. Anterior Lumbar Interbody Fusion Using a Personalized Approach: Is Custom the Future of Implants for Anterior Lumbar Interbody Fusion Surgery? *World Neurosurgery*. 2019. Vol. 124. P. 452–458.
81. Mohammad K. Customised Cranioplasty Implant for Decompressive Craniectomy Patients — A Technical Note. *Turkish Neurosurgery*. 2019. Vol. 29, N 1. P. 148–150. DOI: 10.5137/1019-5149.JTN.19895-17.1.
82. Morales-Gomez J.A., Garcia-Estrada E., Leos-Bortoni J.E., Delgado-Brito M., Flores-Huerta L.E., De La Cruz-Arriaga A.A., Torres-Díaz L.J., de León R.M. Cranioplasty with a low-cost customized polymethylmethacrylate implant using a desktop 3D printer. *Journal of Neurosurgery*. 2018. Vol. 15. P. 1–7. DOI: 10.3171/2017.12.JNS172574.
83. Moroni L. Biofabrication strategies for 3D *in vitro* models and regenerative medicine. *Nature Reviews Materials*. 2018. Vol. 3, N 5. P. 21–37.
84. Muelleman T.J., Peterson J., Chowdhury N.I., Gorup J., Camarata P., Lin J. Individualized Surgical Approach Planning for Petroclival Tumors Using a 3D Printer. *Journal of Neurological Surgery Part B Skull Base*. 2015. Vol. 77, N 3. P. 243–248.
85. Naftulin J.S., Kimchi E.Y., Cash S.S. Streamlined, Inexpensive 3D Printing of the Brain and Skull. *PLoS One*. 2015. Vol. 10, N 8. P. 136–198.
86. Namba K., Higaki A., Kaneko N., Mashiko T., Nemoto S., Watanabe E. Microcatheter Shaping for Intracranial Aneurysm Coiling Using the 3-Dimensional Printing Rapid Prototyping Technology: Preliminary Result in the First 10 Consecutive Cases. *World Neurosurgery*. 2015. Vol. 84, N 1. P. 178–186. DOI: 10.1016/j.wneu.2015.03.006.
87. Narayanan V., Narayanan P., Rajagopalan R., Karupiah R., Rahman Z.A., Wormald P.J., Van Haselt C.A., Waran V. Endoscopic skull base training using 3D printed models with pre-existing pathology.

European Archives of Oto-Rhino-Laryngology. 2015. Vol. 272, N 3. P. 753–757. DOI: 10.1007/s00405-014-3300-3.

88. Oishi M., Fukuda M., Yajima N., Yoshida K., Takahashi M., Hiraishi T., Takao T., Saito A., Fujii Y. Interactive presurgical simulation applying advanced 3D imaging and modeling techniques for skull base and deep tumors. *Journal of Neurosurgery*. 2013. Vol. 119, N 1. P. 94–105. DOI: 10.3171/2013.3.JNS121109.

89. Okonogi S., Kondo K., Harada N., Masuda H., Nemoto M., Sugo N. Operative simulation of anterior clinoidectomy using a rapid prototyping model molded by a three-dimensional printer. *Acta Neurochirurgica*. 2017. Vol. 159, N 9. P. 1619–1626. DOI: 10.1007/s00701-017-3202-4.

90. Pacione D., Tanweer O., Berman P., Harter D.H. The utility of a multimaterial 3D printed model for surgical planning of complex deformity of the skull base and craniovertebral junction. *Journal of Neurosurgery*. 2016. Vol. 125, N 5. P. 1194–1197.

91. Pakzaban P. A 3-Dimensional-Printed Spine Localizer: Introducing the Concept of Online Dissemination of Novel Surgical Instruments. *Neurospine*. 2018. Vol. 15, N 3. P. 242–248.

92. Panesar S.S., Belo J., D'Souza R.N. Feasibility of Clinician-Facilitated Three-Dimensional Printing of Synthetic Cranioplasty Flaps. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 113. P. 628–637. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.02.111.

93. Park E.K., Lim J.Y., Yun I.S., Kim J.S., Woo S.H., Kim D.S., Shim K.W. Cranioplasty Enhanced by Three-Dimensional Printing: Custom-Made Three-Dimensional-Printed Titanium Implants for Skull Defects. *The Journal of Craniofacial Surgery*. 2016. Vol. 27, N 4. P. 943–949. DOI: 10.1097/SCS.0000000000002656.

94. Philipp H., Neha S., Brando O., Uwe P., Bilal M., Florian M. Patient-Specific Surgical Implants Made of 3D Printed PEEK: Material, Technology, and Scope of Surgical Application. *BioMed Research International*. 2018. Vol. 2018. P. 1–8. URL: <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2018/4520636> (date of access 20.11.2019).

95. Ploch C.C., Mansi C.S. S.A., Jayamohan J., Kuhl E. Using 3D Printing to Create Personalized Brain Models for Neurosurgical Training and Preoperative Planning. *World Neurosurgery*. 2016. Vol. 90. P. 668–674. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.02.081.

96. Rashim K., Verma Pawan K., Sinha V.D. Increasing the safety of surgical treatment for complex Cranio-vertebral anomalies using customized 3D printed models. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2018. Vol. 48. P. 203–208. DOI: 10.1016/j.jocn.2017.10.061.

97. Ryan J.R., Chen T., Nakaji P., Frakes D.H., Gonzalez L.F. Ventriculostomy Simulation Using Patient-

specific ventricular anatomy, 3D Printing, and Hydrogel Casting. *World Neurosurgery*. 2015. Vol. 84. P. 133–139.

98. Ryan J.R., Almefty K.K., Nakaji P., Frakes D.H. Cerebral Aneurysm Clipping Surgery Simulation Using Patient-Specific 3D Printing and Silicone Casting. *World Neurosurgery*. 2016. Vol. 88. P. 175–181. DOI: 10.1016/j.wneu.2015.12.102.

99. Schmieden D.T., Basalo Vázquez S.J., Sangüesa H., van der Does M., Idema T., Meyer A.S. Printing of Patterned, Engineered *E. coli* Biofilms with a Low-Cost 3D Printer. *ACS Synthetic Biology*. 2018. Vol. 7, N 5. P. 1328–1337. DOI: 10.1021/acssynbio.7b00424.

100. Shah A., Jankharia B., Goel A. Three-dimensional model printing for surgery on arteriovenous malformations. *Neurology India*. 2017. Vol. 65, N 6. P. 1350–1354. DOI: 10.4103/0028-3886.217958.

101. Shah K.J., Peterson J.C., Beahm D.D., Camarata P.J., Chamoun R.B. Three-Dimensional Printed Model Used to Teach Skull Base Anatomy Through a Transsphenoidal Approach for Neurosurgery Residents. *Operative Neurosurgery*. 2016. Vol. 12, N 4. P. 326–329. DOI: 10.1227/NEU.0000000000001127.

102. Shakir H.J., Shalkwani H., Levy E.I. Editorial: See One, Do One, Teach One? Paradigm Shift with Three-Dimensional Printing. *Neurosurgery*. 2017. Vol. 80, N 1. P. 3–5. DOI: 10.1093/neuros/nyw001.

103. Singhal A.J., Shetty V., Bhagavan K.R. Improved Surgery Planning Using 3-D Printing: a Case Study. *Indian Journal of Surgery*. 2016. Vol. 78, N 2. P. 100–104.

104. Spottiswoode B.S., Van Den Heever D.J., Chang Y., Engelhardt S., Du Plessis S., Nicolls F. Preoperative threedimensional model creation of magnetic resonance brain images as a tool to assist neurosurgical planning. *Stereotactic and Functional Neurosurgery*. 2013. Vol. 91, N 3. P. 16–29.

105. Sugawara T., Higashiyama N., Kaneyama S., Takabatake M., Watanabe N., Uchida F. Multistep pedicle screw insertion procedure with patientspecific lamina fitandlock templates for the thoracic spine. *Journal of Neurosurgery*. 2013. Vol. 19. P. 185–190.

106. Sullivan S., Aguilar-Salinas P., Santos R., Beier A.D., Hanel R.A. Three-dimensional printing and neuroendovascular simulation for the treatment of a pediatric intracranial aneurysm: case report. *Journal of Neurosurgery Pediatric*. 2018. Vol. 22, N 6. P. 672–677. DOI: 10.3171/2018.6.PEDS17696.

107. Tai B.L., Rooney D., Stephenson F., Liao P., Sagher O., Shih A.J. Development of a 3Dprinted external ventricular drain placement simulator: Technical note. *Journal of Neurosurgery*. 2015. Vol. 123, N 4. P. 829–1112.

108. Tan E.T., Ling J.M., Dinesh S.K. The feasibility of producing patient-specific acrylic cranioplasty implants with a low-cost 3D printer. *Journal of Neurosurgery*. 2016. Vol. 124, N 5. P. 1531–1537. DOI: 10.3171/2015.5.JNS15119.
109. Tappa K., Jammalamadaka U. Novel Biomaterials Used in Medical 3D Printing Techniques. *Journal of Functional Biomaterials*. 2018. Vol. 9, N 1. P. 17. URL: <http://www.mdpi.com/2079-4983/9/1/17> (date of access 20.11.2019).
110. Thawani J.P., Pisapia J.M., Singh N., Petrov D., Schuster J.M., Hurst R.W., Zager E.L., Pukenas B.A. Three-Dimensional Printed Modeling of an Arteriovenous Malformation Including Blood Flow. *World Neurosurgery*. 2016. Vol. 90. P. 675–683. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.03.095.
111. Thawani J.P., Singh N., Pisapia J.M., Abdullah K.G., Parker D., Pukenas B.A., Zager E.L., Verma R., Brem S. Three-Dimensional Printed Modeling of Diffuse Low-Grade Gliomas and Associated White Matter Tract Anatomy. *Neurosurgery*. 2017. Vol. 80, N 4. P. 635–645. DOI: 10.1093/neuros/nyx009.
112. Tomoko I., Yuko S., Rio H., Shinya H., Kentaro H., Naohiko H., Noboru K., Takumi O. Computer assisted mandibular reconstruction using a custom-made titan mesh tray and removable denture based on the top-down treatment technique. *Journal of Prosthodontic Research*. 2016. Vol. 60, N 4. P. 321–331. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1883195816000153?via%3Dihub> (date of access 20.11.2019).
113. Troebinger L., López J.D., Lutti A., Bradbury D., Bestmann S., Barnes G. High precision anatomy for MEG. *Neuroimage*. 2014. Vol. 86. P. 583–591.
114. van de Belt T.H., Nijmeijer H., Grim D., Engelen L.J.L.P.G., Vreeken R., van Gelder M.M.H.J., Ter Laan M. Patient-Specific Actual-Size Three-Dimensional Printed Models for Patient Education in Glioma Treatment: First Experiences. *World Neurosurgery*. 2018. Vol. 117. P. 99–105. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.05.190.
115. Wang J.L., Yuan Z.G., Qian G.L., Bao W.Q., Jin G.L. 3D printing of intracranial aneurysm based on intracranial digital subtraction angiography and its clinical application. *Medicine (Baltimore)*. 2018. Vol. 97, No 24. P. e11103. DOI: 10.1097/MD.00000000000011103.
116. Wang L., Ye X., Hao Q., Ma L., Chen X., Wang H., Zhao Y. Three-dimensional intracranial middle cerebral artery aneurysm models for aneurysm surgery and training. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2018. Vol. 50. P. 77–82. DOI: 10.1016/j.jocn.2018.01.074.
117. Wang L., Ye X., Hao Q., Chen Y., Chen X., Wang H., Wang R., Zhao Y., Zhao J. Comparison of Two Three-Dimensional Printed Models of Complex Intracranial Aneurysms for Surgical Simulation. *World Neurosurgery*. 2017. Vol. 103. P. 671–679. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.04.098.
118. Wang X., Li X., Dai X., Zhang X., Zhang J., Xu T., Lan Q. Bioprinting of glioma stem cells improves their endotheliogenic potential. *Colloids Surfaces B: Biointerfaces*. 2018. Vol. 171. P. 629–637. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2018.08.006.
119. Wanibuchi M., Noshiro S., Sugino T., Akiyama Y., Mikami T., Iihoshi S., Miyata K., Komatsu K., Mikuni N. Training for Skull Base Surgery with a Colored Temporal Bone Model Created by Three-Dimensional Printing Technology. *World Neurosurgery*. 2016. Vol. 91. P. 66–72. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.03.084.
120. Waran V., Pancharatnam D., Thambinayagam H.C., Raman R., Rathinam A.K., Balakrishnan Y.K. The utilization of cranial models created using rapid prototyping techniques in the development of models for navigation training. *Journal of Neurological Surgery Part A Central European Neurosurgery*. 2013. Vol. 75, N 1. P. 12–15.
121. Waran V., Narayanan V., Karuppiah R., Thambinayagam H.C., Muthusamy K.A., Rahman Z.A.A. Neurosurgical Endoscopic Training via a Realistic 3Dimensional Model With Pathology. *Simulation in Healthcare*. 2015. Vol. 10, N 1. P. 43–48.
122. Waran V., Menon R., Pancharatnam D., Rathinam A.K., Balakrishnan Y.K., Tung T.S. The creation and verification of cranial models using threedimensional rapid prototyping technology in field of transnasal sphenoid endoscopy. *American Journal of Rhinology & Allergy*. 2012. Vol. 26, N 5. P. 13–26.
123. Waran V., Narayanan V., Karuppiah R., Owen S.L., Aziz T. Utility of multimaterial 3D printers in creating models with pathological entities to enhance the training experience of neurosurgeons. *Journal of Neurosurgery*. 2014. Vol. 120, N 4. P. 89–92.
124. Weinstock P., Prabhu S.P., Flynn K., Orbach D.B., Smith E. Optimizing cerebrovascular surgical and endovascular procedures in children via personalized 3D printing. *Journal of Neurosurgery Pediatrics*. 2015. Vol. 16, N 5. P. 584–589. DOI: 10.3171/2015.3.PEDS14677.
125. Weinstock P., Rehder R., Prabhu S.P., Forbes P.W., Roussin C.J., Cohen A.R. Creation of a novel simulator for minimally invasive neurosurgery: fusion of 3D printing and special effects. *Journal of Neurosurgery Pediatrics*. 2017. Vol. 20, N 1. P. 1–9. DOI: 10.3171/2017.1.PEDS16568.
126. Whatley B.R., Kuo J., Shuai C., Damon B.J., Wen X. Fabrication of a biomimetic elastic interverte-

bral disk scaffold using additive manufacturing. Biofabrication. 2011. Vol. 3. P. 15–24.

127. Wiedermann J.P., Joshi A.S., Jamshidi A., Conchenour C., Preciado D. Utilization of a submental island flap and 3D printed model for skull base reconstruction: Infantile giant cranio-cervicofacial teratoma. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology. 2017. Vol. 92. P. 143–145. DOI: 10.1016/j.ijporl.2016.11.014.

128. Wurm G., Lehner M., Tomancok B., Kleiser R., Nussbaumer K. Cerebrovascular biomodeling for aneurysm surgery: Simulationbased training by means of rapid prototyping technologies. Surgical Innovation. 2011. Vol. 18, N 3. P. 294–306.

129. Wurm G., Tomancok B., Pogady P., Holl K., Trenkler J. Cerebrovascular stereolithographic biomodeling for aneurysm surgery. Technical note. Journal of Neurosurgery. 2004. Vol. 100, N 1. P. 139–145. DOI: 10.3171/jns.2004.100.1.0139.

130. Yang Y., Du T., Zhang J., Kang T., Luo L., Tao J., Gou Z., Chen S., Du Y., He J., Jiang S., Mao Q., Gou M. A 3D-Engineered Conformal Implant Releases DNA Nanocomplex for Eradicating the Postsurgery Residual Glioblastoma. Advanced Science. 2017. Vol. 4, N 8. P. 1–8. DOI: 10.1002/advs.201600491.

131. Yea J.W., Park J.W., Kim S.K., Kim D.Y., Kim J.G., Seo C.Y. Feasibility of a 3D-printed anthropomorphic

patient-specific head phantom for patient-specific quality assurance of intensity-modulated radiotherapy. PLoS ONE. 2017. Vol. 12, N 7. P. 1–10. DOI: 10.1371/journal.pone.0181560.

132. Yin Y., Yu X., Tong H., Xu T., Wang P., Qiao G. Exploratory study of 3D printing technique in the treatment of basilar invagination and atlantoaxial dislocation. Zhonghua Yi Xue Za Zhi. 2015. Vol. 95, N 37. P. 3004–3007.

133. Zhang L., Yang G., Johnson B.N., Jia X. Three-dimensional (3D) printed scaffold and material selection for bone repair. Acta Biomater. 2019. Vol. 15, N 84. P. 16–33. DOI: 10.1016/j.actbio.2018.11.039.

134. Zhang Q., Nguyen P.D., Shi S., Burrell J.C., Cullen D.K., Le A.D. 3D bio-printed scaffold-free nerve constructs with human gingiva-derived mesenchymal stem cells promote rat facial nerve regeneration. Science Reports. 2018. Vol. 8, N 1. P. 66–77. DOI: 10.1038/s41598-018-24888-w.

135. Zheng J.P., Li C.Z., Chen G.Q., Song G.D., Zhang Y.Z. Three-Dimensional Printed Skull Base Simulation for Transnasal Endoscopic Surgical Training. World Neurosurgery. 2018. Vol. 111. P. 773–782. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.12.169.

