



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 517–535  
*Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 517–535  
[mmi.sgu.ru](http://mmi.sgu.ru) <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-4-517-535>, EDN: IJENPA

Научная статья  
УДК 517.98

## Концепция систем поддержки принятия врачебных решений в хирургии позвоночно-тазового комплекса

Д. В. Иванов, Л. В. Бессонов<sup>✉</sup>, И. В. Кириллова,  
Л. Ю. Коссович, С. И. Киреев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

**Иванов Дмитрий Валерьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики, [ivanovdv.84@ya.ru](mailto:ivanovdv.84@ya.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>, AuthorID: 201794

**Бессонов Леонид Валентинович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики, [bessonov@sgu.ru](mailto:bessonov@sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5636-1644>, AuthorID: 774968

**Кириллова Ирина Васильевна**, кандидат физико-математических наук, директор Образовательно-научного института наноструктур и биосистем, [nano-bio@sgu.ru](mailto:nano-bio@sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8053-3680>, AuthorID: 179980

**Коссович Леонид Юрьевич**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой математической теории упругости и биомеханики, [president@sgu.ru](mailto:president@sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4775-7348>, AuthorID: 2935

**Киреев Сергей Иванович**, доктор медицинских наук, декан факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий, [kireevsi@rambler.ru](mailto:kireevsi@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3318-5633>, AuthorID: 620012

**Аннотация.** Отечественные клинические рекомендации по лечению заболеваний и повреждений опорно-двигательного аппарата содержат упоминания о необходимости тщательного предоперационного планирования. В российских медицинских организациях, как правило, применяется традиционный подход к предоперационному планированию, подразумевающий использование ацетатных шаблонов имплантатов наряду с рентгеновскими пленками. В то же время представители ведущих клиник травматолого-ортопедического профиля в России придерживаются мнения, что цифровое предоперационное планирование — это высокоточный метод подбора размеров имплантатов, а также других параметров, необходимых при их установке. Считается, что предоперационное цифровое планирование и виртуальная установка шаблонов имплантатов должны быть интегрированы в предоперационное ведение больных при имплантации в качестве стандартной процедуры. Проведенный опрос экспертов травматологов и ортопедов показал необходимость внедрения компьютерных систем предоперационного планирования, обеспечивающих также и биомеханическую поддержку принимаемого решения, и прогнозирование результатов лечения. В этой связи разработана концепция систем поддержки принятия врачебных решений в хирургии позвоночно-тазового комплекса, лежащая в основе программной платформы Аккорд, являющейся базой для разработки систем предоперационного планирования в хирургии позвоночно-тазового комплекса и крупных суставов. В данной



работе приведены результаты разработки концепции, а также ее апробации. Разработанная и представленная в данной статье концепция также открывает возможности для создания на ее основе систем поддержки принятия врачебных решений в других областях хирургии.

**Ключевые слова:** СППВР, ПТК, биомеханика, биомеханическое моделирование, предоперационное планирование, DICOM, единицы Хаунсфилда

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда перспективных исследований.

**Для цитирования:** Иванов Д. В., Бессонов Л. В., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю., Киреев С. И. Концепция систем поддержки принятия врачебных решений в хирургии позвоночно-тазового комплекса // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 517–535. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-4-517-535>, EDN: IJENPA

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## The concept of medical decision support systems in surgery of the spinal pelvic complex

D. V. Ivanov, L. V. Bessonov<sup>✉</sup>, I. V. Kirillova, L. Yu. Kossovich, S. I. Kireev

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

**Dmitrii V. Ivanov**, ivanovdv.84@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>, AuthorID: 201794

**Leonid V. Bessonov**, bessonov@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-1644>, AuthorID: 774968

**Irina V. Kirillova**, nano-bio@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8053-3680>, AuthorID: 179980

**Leonid Yu. Kossovich**, president@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4775-7348>, AuthorID: 2935

**Sergey I. Kireev**, kireevsi@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3318-5633>, AuthorID: 620012

**Abstract.** Russian clinical guidelines for the treatment of diseases and injuries of the musculoskeletal system contain references to the need for careful preoperative planning. In Russian medical organizations, as a rule, the traditional approach to preoperative planning is used, which implies the use of acetate implant templates along with X-ray films. At the same time, representatives of the leading clinics of trauma and orthopedic profile in Russia are of the opinion that digital preoperative planning is a high-precision method for selecting the size of implants, as well as other parameters required for their installation. It is believed that preoperative digital planning and virtual placement of implant templates should be integrated into the preoperative management of implantation patients as a standard procedure. A survey of experts, traumatologists and orthopedists, showed the need for the introduction of computer systems for preoperative planning, which also provide biomechanical support for the decision made and predict treatment results. In this regard, the concept of support systems for making medical decisions in surgery of the spine-pelvic complex has been developed, which lies at the core of the program platform Accord, which is the basis for the development of preoperative planning systems in surgery of the spine-pelvic complex and large joints. This paper presents the results of the development of the concept, as well as its approbation. The concept developed and presented in this article also opens up opportunities for creating systems to support medical decision-making in other areas of surgery on its basis.



**Keywords:** MDSS, spinal pelvic complex, biomechanics, biomechanical modeling, preoperative planning, DICOM, Haunsfield units

**Acknowledgements:** The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Advanced Research.

**For citation:** Ivanov D. V., Bessonov L. V., Kirillova I. V., Kossovich L. Yu., Kireev S. I. The concept of medical decision support systems in surgery of the spinal pelvic complex. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 517–535 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-4-517-535>, EDN: IJENPA

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Важнейшим условием получения качественных анатомо-функциональных результатов хирургического лечения последствий заболеваний и повреждений позвоночно-тазового комплекса (ПТК) является грамотное предоперационное планирование (ПП). В рамках ПП в травматологической практике осуществляется подбор имплантатов, способов их установки для обеспечения стабильности фиксации и репозиции костных отломков. При эндопротезировании суставов конечностей, корригирующих остеотомиях, а также декомпрессивно-стабилизирующих и корригирующих операциях на ПТК в рамках ортопедического ПП обеспечивается подбор имплантатов для воссоздания оптимальной биомеханики оперируемого сегмента [1, гл. 10, с. 7–24].

Современные программные комплексы, среди которых стоит выделить MediCAD, TraumaCAD, Surgimap, OrthoView [2,3], обладают схожим набором инструментов ПП. С их помощью врач может осуществить рентгеноморфометрические измерения [4] на снимках компьютерной томограммы (КТ) или рентгенограммы, а также расположить шаблоны имплантатов и подобрать их размер. Такое ПП называют геометрическим. В то же время при лечении конкретного пациента может быть запланировано более одного варианта лечения, успешных с точки зрения геометрического ПП. Другими словами, каждый из этих вариантов приведет к адекватной коррекции патологического сегмента ПТК, а также к правильной установке имплантатов. Однако не каждый из запланированных вариантов лечения будет успешным с точки зрения оценки прочности рассматриваемого сегмента ПТК и планируемых к установке имплантатов [5,6].

Оценить успешность лечения с точки зрения прочности конструкции «кость – имплантат» может биомеханическое моделирование. В этой связи этап геометрического планирования (ГП) необходимо дополнить этапом биомеханического моделирования (БМ) и использовать его в качестве одного из инструментов ПП. БМ вместе с ГП позволяют провести количественную оценку вариантов лечения и на этапе ПП построить для каждого из них послеоперационный прогноз в ближайшей перспективе. Но спрогнозировать отдаленные результаты лечения можно только с помощью до- и послеоперационной оценки качества жизни пациентов. Решение этой задачи сегодня осуществляется с помощью опросников и шкал оценки качества жизни пациентов и медицинских регистров [7–10].

Под прогнозированием результатов лечения будем понимать построение индивидуального послеоперационного прогноза на основе до- и послеоперационной оценки качества его жизни и пациентов с аналогичными клиническими случаями.

Таким образом, ПП хирургического лечения последствий заболеваний и повреждений ПТК впервые в мире предлагается осуществлять в три этапа в соответствии



с методологией (способом ПП) «планирование – моделирование – прогноз», которая легла в основу программной платформы Аккорд и пилотной версии системы ПП SmartPlan Ortho 2D<sup>1</sup>, разработанной в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н. Г. Чернышевского (СГУ). При создании программной платформы Аккорд была разработана концепция систем поддержки принятия врачебных решений в хирургии ПТК (концепция СППВР), представленная в данной статье.

## 1. Материалы и методы

При разработке концепции СППВР и программной платформы Аккорд был изучен рынок существующих систем ПП, применяемых в хирургии ПТК, а также научная литература, посвященная ПП, в том числе ГП, БМ, в хирургии ПТК. Обзор литературы осуществлялся по базам данных E-library, Scopus, Web of Science, Google Scholar. Искали и анализировали литературу по следующим тематикам (ключевым словам):

- СППВР в медицине;
- СППВР в хирургии;
- системы предоперационного планирования в хирургии ПТК;
- предоперационное планирование хирургического лечения;
- геометрическое планирование хирургического лечения;
- сагиттальный баланс;
- параметры сагиттального баланса;
- биомеханическое моделирование вариантов лечения;
- биомеханическое моделирование позвоночника, ПТК, тазобедренного сустава, имплантатов;
- прогнозирование результатов лечения.

Также был проведен опрос [11] экспертов в области травматологии и ортопедии (хирургов ортопедов и травматологов), который позволил сформулировать требования к разработке СППВР и ее функциональным возможностям.

Разработка программной платформы Аккорд велась в соответствии с технологией разработки CI/CD (непрерывная интеграция/непрерывное развертывание), подразумевающей разделение ответственности всех участников процесса разработки, тестирования и развертывания, снижение рисков при инкрементальном обновлении продукта и формирование короткого цикла обратной связи с потребителем продукта.

## 2. Результаты

В перечисленных выше базах данных научной литературы было найдено 78 статей, посвященных рассматриваемой в работе проблеме. Также было найдено и проанализировано шесть основных программных продуктов, обеспечивающих процесс ПП в хирургии ПТК. Среди проанализированных продуктов следует выделить такие, как MediCAD, Orthoview, TraumaCAD, Sectra AB, Surgimap (программы для настольного компьютера), Sagittal Meter (мобильное приложение для смартфонов).

Проведен обзор литературы и существующих систем планирования предоперационного планирования в хирургии ПТК [12]. Каждая из проанализированных систем

---

<sup>1</sup> Система предоперационного планирования в хирургии позвоночно-тазового комплекса с биомеханической поддержкой «SmartPlan Ortho 2D». [https://reestr.digital.gov.ru/reestr/339480/?sphrase\\_id=562379](https://reestr.digital.gov.ru/reestr/339480/?sphrase_id=562379)



ПП для настольного компьютера может работать с медицинскими изображениями формата DICOM и имеет интерфейсы для работы с PACS (Picture Archiving and Communication System) серверами. Современные системы планирования позволяют выполнять только геометрическое предоперационное планирование лечения, заключающееся в возможности:

- работы с позвоночником, тазобедренным или коленным суставом;
- автоматического распознавания некоторых анатомических элементов ПТК;
- работы с медицинскими изображениями в формате DICOM и растровыми изображениями;
- оценки единиц Хаунсфилда на изображении;
- выполнения различных геометрических измерений (длин, углов, площадей), необходимых для оценки степени деформации и коррекции, часть из которых осуществляется в полуавтоматическом режиме;
- осуществления разрезов изображения для моделирования виртуальной операции;
- размещения на медицинском изображении шаблонов имплантатов;
- сохранения результатов планирования в базу данных;
- составления отчета о планировании.

Системы планирования, представленные на рынке, позволяют работать с какой-то одной анатомической областью, например с позвоночником, тазобедренными суставами или коленными суставами. Систем, которые могли бы работать с ПТК в целом, на рынке найдено не было.

Анализ литературы выявил, что БМ позволяет персонафицированно оценить виды и типоразмеры имплантатов, риск их поломки и повреждения кости во время операции [13–15]. Более того, разработаны и опубликованы пошаговые инструкции по применению методов обработки медицинских изображений и проведению персонафицированного БМ с применением систем Mimics, Ansys [16]. Но такой подход не позволяет внедрить методику БМ в повседневную практику ПП в клинике и обеспечить потоковое решение задач биомеханики, так как является крайне трудоемким процессом и не позволяет автоматизировать процесс БМ, а предполагает использование дорогостоящих и сложных для использования компьютерных программ.

Что касается вопроса прогнозирования результатов лечения, то анализ литературы показал, что многие исследователи занимаются вопросами выявления предикторов прогноза [17], а также построения моделей прогнозирования результатов лечения деформаций и травм на ПТК [18–22] еще с 80-х гг. прошлого века. В последние годы послеоперационный прогноз и прогнозное обоснование успешных вариантов лечения строят на основе результатов до- и послеоперационного опроса пациентов [23, 24].

Проведенный обзор литературы, а также анализ представленных на рынке систем ГП позволил установить, что разработка СППВР, обладающей функциями ГП, БМ и прогнозирования результатов лечения, является актуальной задачей. Необходима разработка методов по упрощению постановки и решения задач биомеханики, автоматизации методов построения твердотельных и биомеханических моделей исследуемых объектов. Возникает также проблема хранения и использования в БМ высокоточных моделей имплантатов. Крайне актуальным также является вопрос о неинвазивном получении механических свойств моделируемых объектов.

### 3. Разработка концепции СППВР и платформы Аккорд

Приведем далее результаты разработки платформы Аккорд, ее компонентов и концепции, лежащей в ее основе. Платформа имеет модульную структуру, представленную на рис. 1, и обеспечивает ПП в соответствии со способом ПП «планирование – моделирование – прогноз».

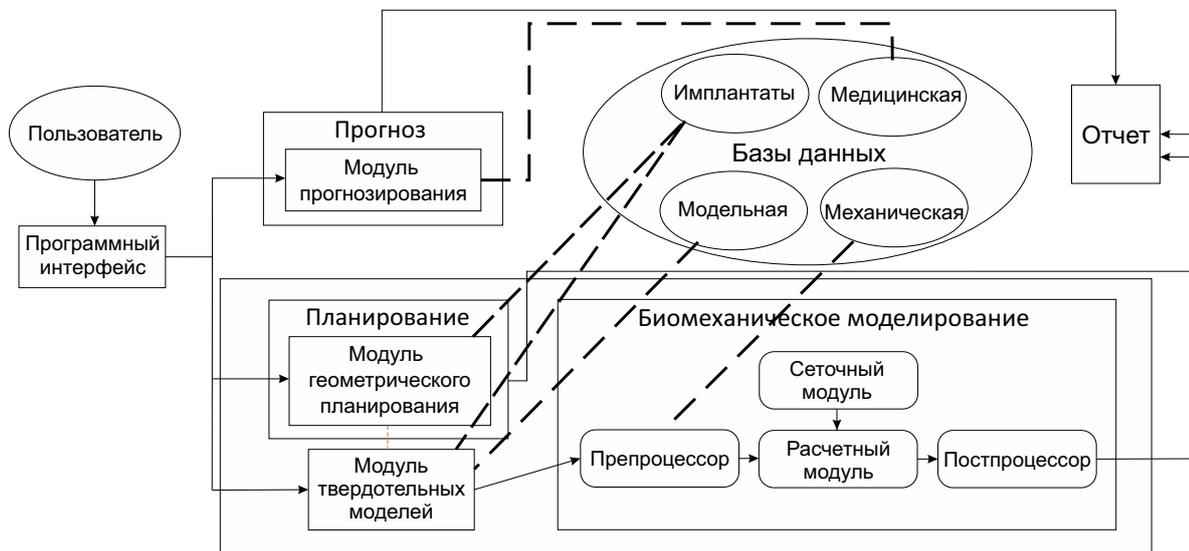


Рис. 1. Структура разработанной программной платформы Аккорд  
Fig. 1. The structure of the developed software platform Accord

Качественное персонализированное ПП невозможно без использования высокоточных шаблонов имплантатов, хранение и использование которых в СППВР осуществляется посредством баз данных (БД). С этой целью была разработана БД «Имплантаты»<sup>2</sup>, содержащая в себе высокоточные шаблоны (для геометрического планирования) и модели (для биомеханического моделирования) имплантатов, зарегистрированных на территории России.

В рамках разработанной платформы ГП может проводиться на настольном компьютере, а также с помощью мобильного приложения «СпиноМетр» [25]. Обе версии программ для ГП для измеряемых хирургом основных геометрических параметров ПТК рассчитывают их оптимальные (теоретические) значения. Таким образом, врач видит, какие параметры необходимо скорректировать во время операции, что на этапе ПП позволяет оценить уровень и степень коррекции.

Для оценки единиц Хаунсфилда костной ткани по КТ, а также неинвазивного измерения модуля Юнга губчатой костной ткани разработана и внедрена в платформу методика [26]. Механические свойства костных тканей, межпозвонковых дисков, связок, имплантатов хранятся в БД «Механическая»<sup>3</sup> и могут быть использованы

<sup>2</sup>Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621564 Российская Федерация. База данных «Имплантаты версии 3.0» для прототипа Системы поддержки принятия врачебных решений, режим персональной виртуальной операционной 3D : № 2021621418 : заявл. 09.07.2021 : опубл. 20.07.2021 / Л. Ю. Коссович, И. В. Кириллова, А. С. Фалькович [и др.] ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает ФОНД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

<sup>3</sup>Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621544 Российская Федерация. База данных «Механическая версии 3.0» для прототипа Системы поддержки принятия врачебных решений, режим персональной виртуальной операционной 3D : № 2021621414 : заявл. 09.07.2021 : опубл. 19.07.2021 / Л. Ю. Коссович, И. В. Кириллова, А. С. Фалькович [и др.] ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает ФОНД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.



в персонифицированном БМ вариантов лечения [27], выполняемого с помощью платформы.

С целью автоматизации процесса БМ и упрощения работы с платформой была разработана и апробирована нейронная сеть, реализующая автоматизированную сегментацию изображений КТ и построения на их основе твердотельных моделей тел позвонков [28].

При работе с платформой врач может выполнять БМ вариантов лечения, решая задачу статики механики деформируемого твердого тела [15, 29, 30]. Другими словами, врачу доступен инструмент оценки прочности (напряженно-деформированного состояния) системы «кость-имплантат» под действием внешних типовых нагрузок. Такими нагрузками моделируются статическое положение тела человека, а также его различные повороты и вращения [30–35].

Для составления индивидуального послеоперационного прогноза в рамках ПП посредством разработанной платформы с помощью БД «Медицинская»<sup>4</sup> хранятся и анализируются результаты до- и послеоперационных опросов пациентов об их качестве жизни. БД «Медицинская» используется и для формирования регистровых выгрузок, лежащих в основе медицинских регистров [36–39] пациентов с патологиями ПТК. БД «Медицинская» также является инструментом ведения электронной медицинской карты пациента и хранения медицинских изображений формата DICOM [40].

Ряд клинических случаев (например, сочетанные патологии, врожденные деформации [41] и др.) требует высокоточного и трехмерного ГП и БМ, необходимого для обоснования выбора успешного варианта лечения. В то же время в своей практике врачи, как правило, сталкиваются со «стандартными» клиническими случаями, при лечении которых можно обойтись «стандартными» алгоритмами лечения.

Для решения задач ПП и «сложных», и «стандартных» клинических случаев платформа Аккорд может использоваться в двух режимах: персональная виртуальная операционная (ПВО) и региональный центр (РЦ). В режиме ПВО врач самостоятельно планирует лечение «стандартных» клинических случаев и использует настольный компьютер в клинике, что позволяет решать задачу ПП в упрощенной постановке. В режиме ПВО используется базовая версия программного обеспечения СППВР и имеющего ограничения в постановке задачи биомеханики. В режиме РЦ используется расширенная версия программного обеспечения платформы, которая подразумевает использование мощных вычислительных компьютеров и позволяет решать задачу биомеханики в наиболее полной постановке. В этой связи предполагается привлечение инженеров-биомехаников для выполнения БМ в рамках режима РЦ. Реализация режимов работы платформы позволяет решать задачу ПП для всех клинических случаев, возникающих в практике врачей хирургов травматологов и ортопедов. Схема взаимодействия РЦ и медицинской организации (клиники) представлена на рис. 2.

Все модули платформы, отвечающие за ПП в соответствии со способом «планирование – моделирование – прогноз», имеют единую систему аутентификации и авторизации пользователей. Поэтому администратор медицинской организации (МО) может гибко определять уровень доступа пользователя (врача, заведующего отделением, главного врача и иных лиц) к данным пациентов и протоколам ПП.

<sup>4</sup>Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622181 Российская Федерация. База данных «Медицинская» для прототипа Системы поддержки принятия врачебных решений, режим персональной виртуальной операционной : № 2020621719 : заявл. 01.10.2020 : опублик. 06.11.2020 / Л. Ю. Коссович, И. В. Кириллова, А. С. Фалькович [и др.] ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает ФОНД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

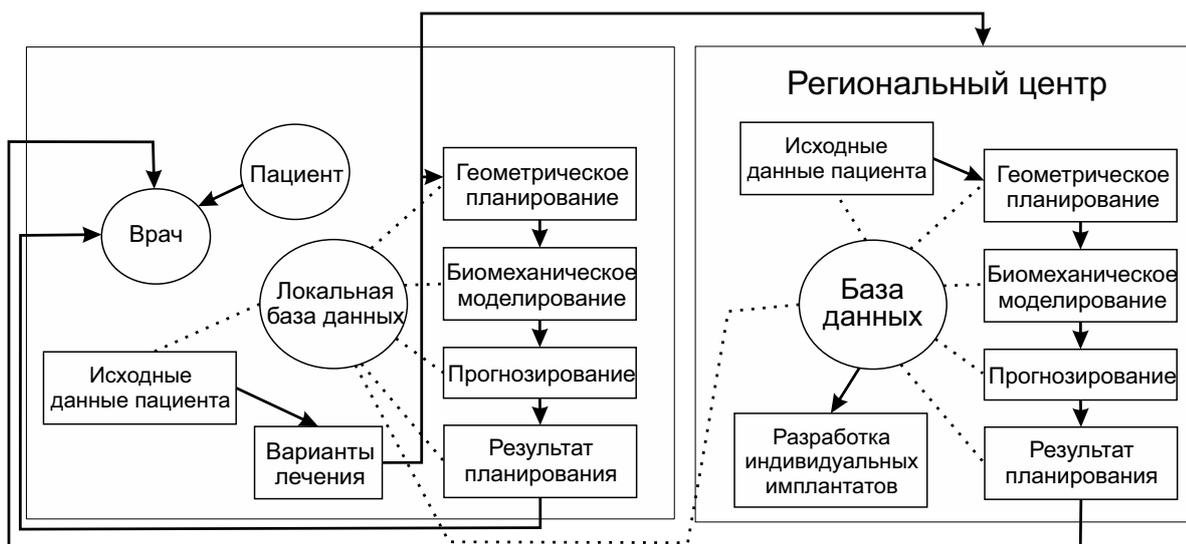


Рис. 2. Схема взаимодействия регионального центра и медицинской организации  
 Fig. 2. Scheme of interaction between a regional center and a medical organization

В БД платформы центральной сущностью является пациент, с которым ассоциируются его клинические случаи (описанные случаи заболеваний и повреждений элементов ПТК), результаты ПП лечения (в том числе ГП и БМ), имплантаты, планируемые к установке во время операции, а также до- и послеоперационные опросы о качестве жизни. Все медицинские данные в БД платформы хранятся в обезличенном виде.

#### 4. Апробация концепции СППВР и системы ПП

Апробация разработанной концепции, компонентов платформы и платформы в целом проводилась в три этапа (таблица). Технологическая компонента апробации, заключающаяся в обработке обезличенных исходных данных пациентов, образцов имплантатов, работе с платформой и ее компонентами, выполнении ГП, БМ и прогнозировании результатов лечения с помощью платформы (2-й и 3-й этапы апробации) и с помощью специализированного ПО (1-й этап апробации, программы Ansys, SolidWorks), выполнялась сотрудниками СГУ.

План апробации концепции СППВР и платформы Аккорд

Table. Plan for the approbation of the concept of SPPVR and the Accord platform

Этап апробации	Апробация компонентов платформы Аккорд	Количество пациентов, обезличенные данные которых использованы в апробации
Этап 1. Апробация в режиме работы РЦ	Апробация ГП и БМ в режиме РЦ с использованием БД «Медицинская», «Модельная» и «Механическая» платформы Аккорд. Цель: показать возможности способа ПП (с использованием компонентов системы ПП и специализированного ПО) при обосновании оптимального варианта лечения для конкретного пациента	25



Окончание таблицы / Continuing of the Table

Этап апробации	Апробация компонентов платформы Аккорд	Количество пациентов, обезличенные данные которых использованы в апробации
Этап 2. Апробация в режиме работы ПВО (2D)	Апробация ГП, БМ в режиме ПВО (2D) с использованием: мобильного приложения «СпиноМетр», «Модуля твердотельных моделей», «Модуля препроцессор», «Сеточного модуля», «Расчетного модуля», «Модуля постпроцессор», «Модуля БД» платформы Аккорд при обосновании оптимального варианта лечения для конкретного пациента, а также при сегментации изображений КТ, расчете параметров сагиттального баланса ПТК	30
Этап 3. Апробация в режиме работы ПВО (3D)	Апробация ГП, БМ в режиме ПВО (3D) с использованием платформы Аккорд	26

Медико-экспертная компонента апробации, заключающаяся в сборе, анализе и предоставлении обезличенных исходных данных пациентов, образцов имплантов, работе с медицинскими регистрами пациентов, консультировании медицинских работников и медиго-экспертном сопровождении работы платформы, выполнялась сотрудниками СГМУ им. В. И. Разумовского.

Этап 1 апробации показал, что способ ПП «планирование – моделирование – прогноз» позволяет для конкретного пациента с заболеванием и/или повреждением ПТК выбрать оптимальный вариант лечения. Оценка эффективности результатов апробации была проведена экспертами СГМУ им. В. И. Разумовского. Эффективность составила 95%.

Результаты этапа 2 апробации подтвердили возможности системы ПП при планировании лечения последствий заболеваний и повреждений ПТК в режиме ПВО (2D). Другими словами, система ПП обеспечивает полный цикл планирования, а интерфейс ее компонентов доступен для использования врачами в клинической практике. Мобильное приложение «СпиноМетр» обеспечивает высокую точность и удобство измерения и прогнозного расчета параметров сагиттального баланса наравне с аналогичными программами для настольного компьютера (Surgimar), а его межэкспертная надежность была доказана в рамках апробации [25]. Также было показано [42], что точность автоматического распознавания двумерных тел позвонков в «Модуле твердотельных моделей» платформы составляет 91%, это соответствует результатам аналогичных исследований [43].

Этап 3 апробации показал, что платформа может быть использована не только для персонифицированного ГП и БМ, но и для прогнозирования результатов лечения в отдаленном периоде [27]. Более того, было показано [28], что в рамках платформы решена задача автоматизированного построения индивидуализированных трехмерных твердотельных моделей элементов позвоночно-тазового комплекса, а также реализован компонент, позволяющий неинвазивно определить механические свойства костной ткани на основании анализа областей компьютерной томограммы, соответствующих распознанным позвонкам [26, 28].



В результате проведенного анализа и разработки платформы была сформулирована концепция СППВР в хирургии ПТК. Концепция включает в себя требования к разработке СППВР, обеспечивающих ПП вариантов лечения последствий заболеваний и повреждений ПТК и работающих на основе способа ПП «планирование – моделирование – прогноз».

Современная СППВР в хирургии ПТК должна:

- 1) основываться на способе «планирование – моделирование – прогноз»;
- 2) работать с медицинскими данными пациента формата DICOM;
- 3) иметь в составе БД с шаблонами и моделями имплантов, механическими свойствами элементов ПТК и медицинскими данными пациентов;
- 4) работать с обезличенными данными пациентов;
- 5) обеспечивать полный цикл ПП, включающий в себя ГП, БМ и прогнозирование результатов лечения;
- 6) рассчитывать оптимальные (теоретические) значения основных геометрических параметров сагиттального баланса ПТК;
- 7) неинвазивно определять механические свойства костных тканей ПТК;
- 8) иметь в составе средства формирования регистра пациентов с патологиями ПТК;
- 9) иметь модульную структуру и единую систему аутентификации и авторизации пользователей;
- 10) хранить в БД все результаты ПП (включая результаты ГП и БМ, прогнозирования);
- 11) автоматически сегментировать изображения КТ и создавать на их основе твердотельные модели элементов ПТК;
- 12) работать в двух режимах и покрывать все возможные задачи ПП для «стандартных» и «сложных» клинических случаев заболеваний и повреждений ПТК.

## 5. Обсуждение

Проведенное исследование выявило, что ГП в рамках ПП успешно реализовано в современных системах ПП, используемых в России и за рубежом. Но опыта полноценного внедрения процессов БМ и прогнозирования результатов лечения в ежедневную клиническую практику, а также их реализации в СППВР обнаружено не было. В то же время некоторые исследователи успешно применяют БМ при планировании лечения, исследовании прочности конструкции «кость-имплантат», стабильности фиксации при подборе имплантатов и техник их установки [44–49]. Вопросы прогнозирования результатов лечения также поднимаются современными исследователями [50, 51]. Таким образом, задача разработки и внедрения СППВР с функциями ГП, БМ и прогнозирования является актуальной. Актуальность также подтверждается результатами проведенного опроса [11] экспертов в области травматологии и ортопедии (хирургов ортопедов и травматологов), более 60% которых считают необходимым использование компьютерных систем ПП в своей деятельности. Среди вертебрологов такое мнение разделяют более 70% специалистов. Более того, представители организаторов здравоохранения подтверждают [52], что СППВР в хирургии ПТК является востребованным компонентом отраслевой автоматизированной системы управления.

Данная работа формулирует концепцию СППВР, обеспечивающей ПП в соответствии со способом «планирование – моделирование – прогноз». Разработанная кон-



цепция легла в основу программной платформы Аккорд и пилотной версии системы предоперационного планирования SmartPlan Ortho 2D, реализованных в СГУ при поддержке Фонда перспективных исследований. Разработка программной платформы Аккорд велась с 2018 по 2021 г., каждый этап которой сопровождался апробацией режимов работы, компонентов программной платформы Аккорд и платформы в целом совместно со специалистами ведущих отечественных медицинских организаций травматолого-ортопедического профиля. Среди таких организаций следует отметить ВМА им. С. М. Кирова, НМИЦ ТО им. Н. Н. Приорова, НМИЦ ТО им. академика Г. А. Илизарова, НИИ скорой помощи им. И. И. Джанелидзе, НМИЦ ТО им. Р. Р. Вредена, СГМУ им. В. И. Разумовского. Апробация показала, что разработанная платформа позволяет эффективно планировать лечение последствий повреждений и заболеваний ПТК.

Разработанная концепция открывает возможности для создания на ее основе СППВР в других областях хирургии, так как определяет фундаментальные требования к таким системам, основанным на методологии ПП «планирование – моделирование – прогноз».

### Список литературы

1. Руководство по хирургии тазобедренного сустава / под ред. Р. М. Тихилова, И. И. Шубнякова. Т. 2. Санкт-Петербург : РНИИТО, 2015. 355 с. EDN: [WIOZMD](#)
2. *Zawojcka K., Wnuk-Scardaccione A., Bilski J., Nitecka E.* Correlation of body mass index with pelvis and lumbar spine alignment in sagittal plane in hemophilia patients // *Medicina (Kaunas)*. 2019. Vol. 55, iss. 10. P. 627. <https://doi.org/10.3390/medicina55100627>
3. *Рябых С. О., Ульрих Э. В., Мушкин А. Ю., Губин А. В.* Лечение врожденных деформаций позвоночника у детей: вчера, сегодня, завтра // *Хирургия позвоночника*. 2020. Т. 17, № 1. С. 15–24. <http://dx.doi.org/10.14531/ss2020.1.15-24>
4. *Ames C. P., Smith J. S., Scheer J. K., Bess S., Bederman S.S., Deviren V., Lafage V., Schwab F., Shaffrey C. I.* Impact of spinopelvic alignment on decision making in deformity surgery in adults: A review // *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2012. Vol. 16, iss. 6. P. 547–564. <https://doi.org/10.3171/2012.2.SPINE11320>
5. *Wang B., Ke W., Hua W., Zeng X., Yang C.* Biomechanical evaluation and the assisted 3D printed model in the patient-specific preoperative planning for thoracic spinal tuberculosis: A finite element analysis // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. № 8. P. 807. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00807>
6. *Wolański W., Gzik-Zroska B., Kawlewska E., Gzik M., Larysz D., Dzielicki J., Rudnik A.* Preoperative planning of surgical treatment with the use of 3D visualization and finite element method // *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics*. 2015. Vol. 19. P. 139–163. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13407-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13407-9_9)
7. *Cao P., Hao W., Zhang L., Zhang Q., Liu X., Li M.* Safety and efficacy studies of vertebroplasty with dual injections for the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures: Preliminary report // *Academic Radiology*. 2020. Vol. 27, iss. 8. P. e224–e231. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.09.023>
8. *Cook C. E., Learman K. E., O'Halloran B. J., Showalter C. R., Kabbaz V. J., Goode A. P., Wright A. A.* Which prognostic factors for low back pain are generic predictors of outcome across a range of recovery domains? // *Physical Therapy*. 2013. Vol. 93, iss. 1. P. 32–40. <https://doi.org/10.2522/ptj.20120216>
9. *Cheng L., Cai H., Yu Y., Li W., Li Q., Liu Z.* Modified full-endoscopic interlaminar discectomy via an inferior endplate approach for lumbar disc herniation: retrospective 3-year results from 321 patients // *World Neurosurg*. 2020. Vol. 141. P. e537–e544. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.10.034>



10. Fairbank J. C., Pynsent P. B. The Oswestry disability index // *Spine*. 2000. Vol. 25, iss. 22. P. 2940–2952. <https://doi.org/10.1097/00007632-200011150-00017>
11. Федонников А. С., Колесникова А. С., Рожкова Ю. Ю., Кириллова И. В., Ковтун А. Л., Коссович Л. Ю. Анализ потребностей медицинских специалистов при проектировании систем поддержки принятия врачебных решений для травматологии и ортопедии // Технологические инновации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии: интеграция науки и практики : сб. науч. тр. Саратов : Амирит, 2019. С. 286–288. EDN: [CEJKPV](https://doi.org/10.18019/1028-4427-2019-25-2-243-253)
12. Колесникова А. С., Федонников А. С., Кириллова И. В., Ульянов В. Ю., Левченко К. К., Куреев С. И., Коссович Л. Ю., Норкин И. А. Возможности систем поддержки принятия решений в контексте хирургии позвоночно-тазового комплекса (аналитический обзор) // *Гений ортопедии*. 2019. Т. 25, № 2. С. 243–253. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2019-25-2-243-253>
13. Shin J. K., Lim B. Y., Goh T. S., Son S. M., Kim H. S., Lee J. S., Lee C. S. Effect of the screw type (S2-alar-iliac and iliac), screw length, and screw head angle on the risk of screw and adjacent bone failures after a spinopelvic fixation technique: A finite element analysis // *PLoS One*. 2018. Vol. 13, iss. 8. P. 296–301. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201801>
14. Jia Y. W., Cheng L. M., Yu G. R., Du C. F., Yang Z. Y., Yu Y., Ding Z. Q. A finite element analysis of the pelvic reconstruction using fibular transplantation fixed with four different rod-screw systems after type I resection // *Chinese Medical Journal*. 2008. Vol. 121, iss. 4. P. 321–326. <http://dx.doi.org/10.1097/00029330-200802020-00008>
15. Доль А. В., Доль Е. С., Иванов Д. В. Биомеханическое моделирование вариантов хирургического реконструктивного лечения спондилолистеза позвоночника на уровне L4–L5 // *Российский журнал биомеханики*. 2018. Т. 22, № 1. С. 31–44. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2018.1.03>, EDN: [YMCSSL](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2018.1.03)
16. Wu W., Han Z., Hu B., Du C., Xing Z., Zhang C., Gao J., Shan B., Chen C. A graphical guide for constructing a finite element model of the cervical spine with digital orthopedic software // *Annals of Translational Medicine*. 2021. Vol. 9, № 2. <https://doi.org/10.21037/atm-20-2451>
17. Pitkänen M. T., Manninen H. I., Lindgren K. A., Sihvonon T. A., Airaksinen O., Soimakallio S. Segmental lumbar spine instability at flexion-extension radiography can be predicted by conventional radiography // *Clinical Radiology*. 2002. Vol. 57, iss. 7. P. 632–639. <https://doi.org/10.1053/crad.2001.0899>
18. Байков Е. С. Прогнозирование результатов хирургического лечения грыж поясничных межпозвонковых дисков : дис. ... канд. мед. наук. Новосибирск, 2014. 135 с.
19. Крутько А. В., Пелеганчук А. В., Козлов Д. М., Гладков А. В., Ахметьянов Ш. А. Корреляционная зависимость клинико-морфологических проявлений и биомеханических параметров у больных с дегенеративным спондилолистезом 14 позвонка // *Травматология и ортопедия России*. 2011. Вып. 4 (62). С. 44–52. EDN: [OXYZVR](https://doi.org/10.1053/crad.2001.0899)
20. Байков Е. С., Русова Т. В., Крутько А. В., Байкалов А. А. Связь биохимических параметров позвоночно-двигательного сегмента с результатами хирургического лечения грыж поясничных межпозвонковых дисков // *Хирургия позвоночника*. 2013. № 2. С. 43–49. <https://doi.org/10.14531/ss2013.2.43-49>, EDN: [QASRWB](https://doi.org/10.14531/ss2013.2.43-49)
21. Хвисьюк Н. И., Продан А. И., Волков Е. В. Прогнозирование результатов хирургического лечения корешковых синдромов при грыжах и массивных протрузиях межпозвонковых дисков // *Ортопедия, травматология и протезирование*. 1985. № 5. С. 34–38.
22. Than K. D., Park P., Fu K. M., Nguyen S., Wang M. Y., Chou D., Nunley P. D., Anand N., Fessler R. G., Shaffrey C. I., Bess S., Akbarnia B. A., Deviren V., Uribe J. S., La Marca F., Kanter A. S., Okonkwo D. O., Mundis G. M., Mummaneni P. V. Clinical and radiographic parameters associated with best versus worst clinical outcomes in minimally invasive spinal deformity surgery // *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2016. Vol. 25, iss. 1. P. 21–25. <https://doi.org/10.3171/2015.12.SPINE15999>



23. Solberg T., Johnsen L. G., Nygaard Ø. P., Grotle M. Can we define success criteria for lumbar disc surgery? // *Acta Orthopaedica*. 2013. Vol. 84, iss. 2. P. 196–201. <https://doi.org/10.3109/17453674.2013.786634>
24. Werner D. A. T., Grotle M., Gulati S., Austevoll I. M., Lønne G., Nygaard Ø. P., Solberg T. K. Criteria for failure and worsening after surgery for lumbar disc herniation: a multicenter observational study based on data from the Norwegian Registry for Spine Surgery // *European Spine Journal*. 2017. Vol. 26. P. 2650–2659. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5185-5>
25. Иванов Д. В., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю., Лихачев С. В., Полиенко А. В., Харламов А. В., Шульга А. Е. Сравнительный анализ мобильного приложения для измерения параметров сагиттального баланса «СпиноМетр» с системой Surgimar: апробация межэкспертной надежности // *Гений ортопедии*. 2021. Т. 27, № 1. С. 74–79. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-1-74-79>, EDN: MXWDWV
26. Bessonov L. V., Golyadkina A. A., Dmitriev P. O., Dol A. V., Zolotov V. S., Ivanov D. V., Kirillova I. V., Kossovich L. Yu., Titova Yu. I., Ulyanov V. Yu., Kharlamov A. V. Constructing the dependence between the Young's modulus value and the Hounsfield units of spongy tissue of human femoral heads // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 182–193. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-2-182-193>
27. Бескровный А. С., Бессонов Л. В., Голядкина А. А., Доль А. В., Иванов Д. В., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю., Сидоренко Д. А. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений в травматологии и ортопедии. Биомеханика как инструмент предоперационного планирования // *Российский журнал биомеханики*. 2021. Т. 25, № 2. С. 118–133. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2021.2.01>, EDN: IEGOHC
28. Бескровный А. С., Бессонов Л. В., Иванов Д. В., Золотов В. С., Сидоренко Д. А., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю. Построение трехмерных твердотельных моделей позвонков с использованием сверточных нейронных сетей // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 368–378. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-3-368-378>
29. Su Y.-S., Ren D., Wang P. C. Comparison of biomechanical properties of single- and two-segment fusion for Denis type B spinal fractures // *Orthopaedic Surgery*. 2013. Vol. 5, iss. 4. P. 266–273. <https://doi.org/10.1111/os.12068>
30. Rohlmann A., Zander T., Rao M., Bergmann G. Applying a follower load delivers realistic results for simulating standing // *Journal of Biomechanics*. 2009. Vol. 42, iss. 10. P. 1520–1526. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.03.048>
31. Rohlmann A., Zander T., Rao M., Bergmann G. Realistic loading conditions for upper body bending // *Journal of Biomechanics*. 2009. Vol. 42, iss. 7. P. 884–890. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.01.017>
32. Zahari S. N., Latif M. J. A., Rahim N. R. A., Kadir M. R. A., Kamarul T. The effects of physiological biomechanical loading on intradiscal pressure and annulus stress in lumbar spine: a finite element analysis // *Journal of Healthcare Engineering*. 2017. Vol. 2017. Art. 9618940. 8 p. <https://doi.org/10.1155/2017/9618940>
33. Kim Y. H., Khuyagbaatar B., Kim K. Recent advances in finite element modeling of the human cervical spine // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. Vol. 32. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-1201-2>
34. Xu M., Yang J., Lieberman I. H., Haddas R. Lumbar spine finite element model for healthy subjects: development and validation // *Computer Methods in Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 20, iss. 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.1080/10255842.2016.1193596>
35. Dreischarf M., Rohlmann A., Bergmann G., Zander T. Optimised loads for the simulation of axial rotation in the lumbar spine // *Journal of Biomechanics*. 2011. Vol. 44, iss. 12. P. 2323–2327. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.05.040>



36. Ягудина Р. И., Литвиненко М. М., Сороковиков И. В. Регистры пациентов: структура, функции, возможности использования // Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология. 2011. Т. 4, вып. 4. С. 3–7. EDN: OISBOT
37. Gliklich R., Dreyer N., Leavy M. (eds.) Registries for Evaluating Patient Outcomes: A User's Guide. Third edition. Two volumes. (Prepared by the Outcome DEcIDE Center [Outcome Sciences, Inc., a Quintiles company] under Contract No. 290 2005 00351 TO7). AHRQ Publication No. 13(14)-EHC111. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. April 2014 (<http://www.effectivehealthcare.ahrq.gov/registries-guide-3.cfm>).
38. Spine Tango Overview. URL: <https://www.eurospine.org/spine-tango.htm> (дата обращения: 30.10.2018).
39. Swedish Society of Spinal Surgeons. URL: [http://www.4s.nu/4s\\_eng/index.htm](http://www.4s.nu/4s_eng/index.htm) (дата обращения: 29.10.2018).
40. DICOM. Digital imaging and communication in medicine. URL: <https://www.dicomstandard.org/> (дата обращения 27.10.2019).
41. Кулешов А. А., Ветрилэ М. С., Лисянский И. Н., Макаров С. Н., Соколова Т. В. Хирургическое лечение пациента с врожденной деформацией позвоночника, аплазией корней дуг грудных и поясничных позвонков, компрессионным спинальным синдромом // Хирургия позвоночника. 2016. Т. 13, вып. 3. С. 41–48. <https://doi.org/10.14531/ss2016.3.41-48>
42. Бескровный А. С., Бессонов Л. В., Иванов Д. В., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю. Использование сверточной нейронной сети для автоматизации построения двумерных твердотельных моделей позвонков // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 502–516. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2020-20-4-502-516>
43. Sekuboyina A., Bayat A., Husseini M. E., Löffler M., Rempfler M., Kukacka J., Tetteh G., Valentinitsch A., Payer C., Urschler M., Chen M., Cheng D., Lessmann N., Hu Y., Wang T., Yang D., Xu D., Ambellan F., Zachow S., Jiang T., Ma X., Angerman Ch., Wang X., Wei Q., Brown K., Wolf M., Kirszenberg A., Puybareauq É., Menze B. H., Kirschke J. VerSe: A Vertebrae labelling and segmentation benchmark for multi-detector CT images // Medical Image Analysis. 2021. Vol. 73. Art. 102166. <https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102166>
44. Quagliarella L., Boccaccio A., Lamberti L., Sasanelli N. Biomechanical effects of prosthesis neck geometries to contrast limb lengthening after hip replacement // Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics. 2006. Vol. 4, iss. 1. P. 45–54. <https://doi.org/10.5301/JABB.2008.2488>
45. Widmer K.-H., Majewski M. The impact of the CCD-angle on range of motion and cup positioning in total hip arthroplasty // Clinical Biomechanics. 2005. Vol. 20. P. 723–728. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.04.003>
46. Brandolini N. Experimental methods for the biomechanical investigation of the human spine: a review // Journal of Mechanics in Medicine and Biology. 2014. Vol. 14, iss. 1. Art. 1430002. <https://doi.org/10.1142/S0219519414300026>
47. Dreischarf M. Biomechanics of the L5–S1 motion segment after total disc replacement – Influence of iatrogenic distraction, implant positioning and preoperative disc height on the range of motion and loading of facet joints // Journal of Biomechanics. 2015. Vol. 48, iss. 12. P. 3283–3291. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.06.023>
48. Dreischarf M. Comparison of eight published static finite element models of the intact lumbar spine: predictive power of models improves when combined together // Journal of Biomechanics. 2014. Vol. 47, iss. 8. P. 1757–1766. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.04.002>
49. Hübner A. R. Numerical analysis of multi-level versus short instrumentation for the treatment of thoracolumbar fractures // European Journal of Orthopaedic Surgery &





- decision support systems for traumatology and orthopedics. In: *Technological Innovations in Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery: Integration of Science and Practice*. Saratov, Amirit, 2019, pp. 286–288 (in Russian). EDN: [CEJKPV](#)
12. Kolesnikova A. S., Fedonnikov A. S., Kirillova I. V., Ulianov V. Iu., Levchenko K. K., Kireev S. I., Kossovich L. Iu., Norikin I. A. The possibilities with decision support systems in surgery of spine-pelvic complex (analytical review). *Genij Ortopedii* [Genius of Orthopedics], 2019, vol. 25, iss. 2, pp. 243–253 (in Russian). <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2019-25-2-243-253>
  13. Shin J. K., Lim B. Y., Goh T. S., Son S. M., Kim H. S., Lee J. S., Lee C. S. Effect of the screw type (S2-alar-iliac and iliac), screw length, and screw head angle on the risk of screw and adjacent bone failures after a spinopelvic fixation technique: A finite element analysis. *PLoS One*, 2018, vol. 13, iss. 8, pp. 296–301. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201801>
  14. Jia Y. W., Cheng L. M., Yu G. R., Du C. F., Yang Z. Y., Yu Y., Ding Z. Q. A finite element analysis of the pelvic reconstruction using fibular transplantation fixed with four different rod-screw systems after type I resection. *Chinese Medical Journal*, 2008, vol. 121, iss. 4, pp. 321–326. <http://dx.doi.org/10.1097/00029330-200802020-00008>
  15. Dol A. V., Dol E. S., Ivanov D. V. Biomechanical modelling of surgical reconstructive treatment of spinal spondylolisthesis at L4–L5 level. *Russian Journal of Biomechanics*, 2018, vol. 22, iss. 1, pp. 31–44 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2018.1.00>, EDN: [YMCSSL](#)
  16. Wu W., Han Z., Hu B., Du C., Xing Z., Zhang C., Gao J., Shan B., Chen C. A graphical guide for constructing a finite element model of the cervical spine with digital orthopedic software. *Annals of Translational Medicine*, 2021, vol. 9, iss. 2. <https://doi.org/10.21037/atm-20-2451>
  17. Pitkänen M. T., Manninen H. I., Lindgren K. A., Sihvonen T. A., Airaksinen O., Soimakallio S. Segmental lumbar spine instability at flexion-extension radiography can be predicted by conventional radiography. *Clinical Radiology*, 2002, vol. 57, iss. 7, pp. 632–639. <https://doi.org/10.1053/crad.2001.0899>
  18. Baykov E. S. *Predicting the Results of Surgical Treatment of Herniated Lumbar Intervertebral Discs*. Diss. Cand. Sci. (Med.). Novosibirsk, 2014. 135 p. (in Russian).
  19. Krut'ko A. V., Peleganchuk A. V., Kozlov D. M., Gladkov A. V., Ahmetyanov Sh. A. The correlation dependence of the clinical and morphological manifestations and biomechanical parameters in patients with degenerative spondylolisthesis l4 vertebra. *Traumatology and Orthopedics of Russia*, 2011, iss. 4 (62), pp. 44–52 (in Russian). EDN: [OXYZVR](#)
  20. Baikov E. S., Rusova T. V., Krutko A. V., Baikalov A. A. Relationship between biochemical parameters of the spinal motion segment and outcome of surgery for herniated lumbar intervertebral disc. *Hirurgia Pozvonocnika* (Spine Surgery), 2013, iss. 2, pp. 43–49 (in Russian). <https://doi.org/10.14531/ss2013.2.43-49>, EDN: [QASRWB](#)
  21. Khvisyuk N. I., Prodan A. I., Volkov E. V. Predicting the results of surgical treatment of radicular syndromes in hernias and massive protrusions of the intervertebral discs. *Ortopediia, travmatologiya i protezirovaniye* [Orthopedics, Traumatology and Prosthetics], 1985, iss. 5, pp. 34–38 (in Russian).
  22. Than K. D., Park P., Fu K. M., Nguyen S., Wang M. Y., Chou D., Nunley P. D., Anand N., Fessler R. G., Shaffrey C. I., Bess S., Akbarnia B. A., Deviren V., Uribe J. S., La Marca F., Kanter A. S., Okonkwo D. O., Mundis G. M., Mummaneni P. V. Clinical and radiographic parameters associated with best versus worst clinical outcomes in minimally invasive spinal deformity surgery. *Journal of Neurosurgery: Spine*, 2016, vol. 25, iss. 1, pp. 21–25. <https://doi.org/10.3171/2015.12.SPINE15999>
  23. Solberg T., Johnsen L. G., Nygaard Ø. P., Grotle M. Can we define success criteria for lumbar disc surgery? *Acta Orthopaedica*, 2013, vol. 84, iss. 2, pp. 196–201. <https://doi.org/10.3109/17453674.2013.786634>



24. Werner D. A. T., Grotle M., Gulati S., Austevoll I. M., Lønne G., Nygaard Ø. P., Solberg T. K. Criteria for failure and worsening after surgery for lumbar disc herniation: a multicenter observational study based on data from the Norwegian Registry for Spine Surgery. *European Spine Journal*, 2017, vol. 26, pp. 2650–2659. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5185-5>
25. Ivanov D. V., Kirillova I. V., Kossovich L. Yu., Likhachev S. V., Polienko A. V., Kharlamov A. V., Shulga A. E. Comparative analysis of the SpinoMeter mobile application and Surgimap system for measuring the sagittal balance parameters: inter-observer reliability test. *Genij Ortopedii*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 74–79. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-1-74-79>
26. Bessonov L. V., Golyadkina A. A., Dmitriev P. O., Dol A. V., Zolotov V. S., Ivanov D. V., Kirillova I. V., Kossovich L. Yu., Titova Yu. I., Ulyanov V. Yu., Kharlamov A. V. Constructing the dependence between the Young's modulus value and the Hounsfield units of spongy tissue of human femoral heads. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 182–193. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-2-182-193>
27. Beskrovny A. S., Bessonov L. V., Golyadkina A. A., Dol A. V., Ivanov D. V., Kirillova I. V., Kossovich L. Yu., Sidorenko D. A. Development of a decision support system in traumatology and orthopedics. Biomechanics as a tool for preoperative planning. *Russian Journal of Biomechanics*, 2021, vol. 25, iss. 2, pp. 118–133 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2021.2.01>, EDN: IEGOHC
28. Beskrovny A. S., Bessonov L. V., Ivanov D. V., Zolotov V. S., Sidorenko D. A., Kirillova I. V., Kossovich L. Yu. Construction of 3D solid vertebral models using convolutional neural networks. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 368–378 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-3-368-378>
29. Su Y.-S., Ren D., Wang P. C. Comparison of biomechanical properties of single- and two-segment fusion for Denis type B spinal fractures. *Orthopaedic Surgery*, 2013, vol. 5, iss. 4, pp. 266–273. <https://doi.org/10.1111/os.12068>
30. Rohlmann A., Zander T., Rao M., Bergmann G. Applying a follower load delivers realistic results for simulating standing. *Journal of Biomechanics*, 2009, vol. 42, iss. 10, pp. 1520–1526. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.03.048>
31. Rohlmann A., Zander T., Rao M., Bergmann G. Realistic loading conditions for upper body bending. *Journal of Biomechanics*, 2009, vol. 42, iss. 7, pp. 884–890. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.01.017>
32. Zahari S. N., Latif M. J. A., Rahim N. R. A., Kadir M. R. A., Kamarul T. The effects of physiological biomechanical loading on intradiscal pressure and annulus stress in lumbar spine: a finite element analysis. *Journal of Healthcare Engineering*, 2017, vol. 2017, Art. 9618940. 8 p. <https://doi.org/10.1155/2017/9618940>
33. Kim Y. H., Khuyagbaatar B., Kim K. Recent advances in finite element modeling of the human cervical spine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-1201-2>
34. Xu M., Yang J., Lieberman I. H., Haddas R. Lumbar spine finite element model for healthy subjects: development and validation. *Computer Methods in Biomedical Engineering*, 2017, vol. 20, iss. 1, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1080/10255842.2016.1193596>
35. Dreischarf M., Rohlmann A., Bergmann G., Zander T. Optimised loads for the simulation of axial rotation in the lumbar spine. *Journal of Biomechanics*, 2011, vol. 44, iss. 12, pp. 2323–2327. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.05.040>
36. Yagudina R. I., Litvinenko M. M., Sorokovikov I. V. Patients registry: Structure, functions, opp ortunities of app liance. *Farmakoeconomika. Modern Pharmacoeconomics and*



- Pharmacoepidemiology*, 2011, vol. 4, iss. 4, pp. 3–7 (in Russian). EDN: OISBOT
37. Gliklich R., Dreyer N., Leavy M. (eds.) *Registries for Evaluating Patient Outcomes: A User's Guide*. Third edition. Two volumes. (Prepared by the Outcome DEcIDE Center [Outcome Sciences, Inc., a Quintiles company] under Contract No. 290 2005 00351 TO7). AHRQ Publication No. 13(14)-EHC111. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. April 2014 (<http://www.effectivehealthcare.ahrq.gov/registries-guide-3.cfm>).
  38. *Spine Tango Overview*. Available at: <https://www.eurospine.org/spine-tango.htm> (accessed 30 October 2018).
  39. *Swedish Society of Spinal Surgeons*. Available at: [http://www.4s.nu/4s\\_eng/index.htm](http://www.4s.nu/4s_eng/index.htm) (accessed 29 October 2018).
  40. *DICOM. Digital imaging and communication in medicine*. Available at: <https://www.dicomstandard.org/> (accessed 27 October 2019).
  41. Kuleshov A. A., Vetrile M. S., Lisyansky I. N., Makarov S. N., Sokolova T. V. Surgical treatment of a patient with congenital deformity of the spine, the thoracic and lumbar pedicle aplasia, and spinal compression syndrome. *Hirurgiâ pozvonočnika* [Spine Surgery], 2016, vol. 13, iss. 3, pp. 41–48 (in Russian). <https://doi.org/10.14531/ss2016.3.41-48>
  42. Beskrovny A. S., Bessonov L. V., Ivanov D. V., Kirillova I. V., Kossovich L. Yu. Using the mask-RCNN convolutional neural network to automate the construction of two-dimensional solid vertebral models. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 502–516 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2020-20-4-502-516>
  43. Sekuboyina A., Bayat A., Husseini M. E., Löffler M., Rempfler M., Kukacka J., Tetteh G., Valentinič A., Payer C., Urschler M., Chen M., Cheng D., Lessmann N., Hu Y., Wang T., Yang D., Xu D., Ambellan F., Zachow S., Jiang T., Ma X., Angerman Ch, Wang X., Wei Q., Brown K., Wolf M., Kirszenberg A., Puybareauq É, Menze B. H., Kirschke J. VerSe: A Vertebrae labelling and segmentation benchmark for multi-detector CT images. *Medical Image Analysis*, 2021, vol. 73, Art. 102166. <https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102166>
  44. Quagliarella L., Boccaccio A., Lamberti L., Sasanelli N. Biomechanical effects of prosthesis neck geometries to contrast limb lengthening after hip replacement. *Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics*, 2006, vol. 4, iss. 1, pp. 45–54. <https://doi.org/10.5301/JABB.2008.2488>
  45. Widmer K.-H, Majewski M. The impact of the CCD-angle on range of motion and cup positioning in total hip arthroplasty. *Clinical Biomechanics*, 2005, vol. 20, pp. 723–728. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.04.003>
  46. Brandolini N. Experimental methods for the biomechanical investigation of the human spine: a review. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 2014, vol. 14, iss. 1, Art. 1430002. <https://doi.org/10.1142/S0219519414300026>
  47. Dreischarf M. Biomechanics of the L5–S1 motion segment after total disc replacement — Influence of iatrogenic distraction, implant positioning and preoperative disc height on the range of motion and loading of facet joints. *Journal of Biomechanics*, 2015, vol. 48, iss. 12, pp. 3283–3291. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.06.023>
  48. Dreischarf M. Comparison of eight published static finite element models of the intact lumbar spine: predictive power of models improves when combined together. *Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 47, iss. 8, pp. 1757–1766. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.04.002>
  49. Hübner A. R. Numerical analysis of multi-level versus short instrumentation for the treatment of thoracolumbar fractures. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 2015, vol. 25, Suppl. 1, pp. 213–217. <https://doi.org/10.1007/s00590-015-1612-7>
  50. Aalto T., Sinikallio S., Kröger H., Viinamäki H., Herno A., Leinonen V., Turunen V.,



- Savolainen S., Airaksinen O. Preoperative predictors for good postoperative satisfaction and functional outcome in lumbar spinal stenosis surgery — a prospective observational study with a two-year follow-up. *Scandinavian Journal of Surgery*, 2012, vol. 101, iss. 4, pp. 255–260. <https://doi.org/10.1177/145749691210100406>
51. Katz J. N., Stucki G., Lipson S. J., Fossel A. H., Grobler L. J., Weinstein J. N. Predictors of surgical outcome in degenerative lumbar spinal stenosis. *Spine*, 1999, vol. 24, iss. 21, pp. 2229–2233. <https://doi.org/10.1097/00007632-199911010-00010>
52. Fedonnikov A. S. *Improving the Management of Medical Rehabilitation of Patients with Pathology of the Musculoskeletal System*. Diss. Dr. Sci. (Med.). Saratov, 2020. 433 p. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received 20.11.2021

Принята к публикации / Accepted 01.02.2022

Опубликована / Published 30.11.2022