

ISSN 1814-6023 (Print)

ISSN 2524-2350 (Online)

УДК 616.711.6-001.7-089-035

<https://doi.org/10.29235/1814-6023-2023-20-4-289-298>

Поступила в редакцию 10.01.2023

Received 10.01.2023

М. А. Герасименко<sup>1</sup>, А. Н. Мазуренко<sup>1</sup>, С. В. Макаревич<sup>1</sup>, П. С. Ремов<sup>1</sup>, М. А. Косцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SCALES ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ТАКТИКИ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ДЕГЕНЕРАТИВНЫМ СПОНДИЛОЛИСТЕЗОМ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ

**Аннотация.** Цель исследования – разработка виртуального программного комплекса, позволяющего на основе персонализированных показателей осуществлять планирование хирургической тактики и выполнять дифференцированное лечение пациентов с дегенеративным спондилолистезом поясничных позвонков.

Базой для создания виртуального комплекса стали результаты хирургического лечения пациентов ретроспективной группы.

Разработанный виртуальный программный комплекс представляет собой экспертную систему принятия решения о хирургической тактике для пациентов с дегенеративным спондилолистезом поясничных позвонков. Работа программы основана на автоматизированном анализе заданного перечня входных параметров. Ядро виртуального комплекса представлено двумя конфигурациями, одна из которых содержит искусственную нейронную сеть. В результате виртуальной обработки индивидуальных показателей пациента программа выдает ответ в виде двух цветовых шкал с числовыми метками: шкалы дифференцированного выбора между изолированной декомпрессией и декомпрессией, дополненной задним спондилодезом; шкалы дифференцированного выбора между ламинэктомией, дополненной медиальной фасетэктомией, и двусторонней декомпрессией позвоночного канала из одностороннего доступа. С использованием разработанного программного комплекса проведено хирургическое лечение 26 пациентов с дегенеративным спондилолистезом поясничных позвонков.

Виртуальный комплекс Scales, основанный на учете ключевых общесоматических и клинико-рентгенологических показателей пациента, создает возможность для принятия хирургом максимально взвешенного и обоснованного решения по тактике хирургического лечения дегенеративного спондилолистеза на поясничном уровне. Персонализированный подход в сочетании с технологией искусственного интеллекта направлен на снижение вероятности тактических ошибок и отдаленных осложнений после хирургических вмешательств. Использование цветовых шкал с цифровыми метками позволяет упростить процесс предоперационного планирования и создать условия для достижения баланса между решением программы и индивидуальным мнением специалиста-хирурга. Результатом дифференцированного лечения группы пациентов с использованием виртуальной системы стало существенное и статистически значимое ( $p < 0,001$ ) улучшение качества жизни оперированных пациентов в отдаленном периоде.

**Ключевые слова:** спондилолистез, программный комплекс, нейронная сеть, входные параметры, дифференцированное лечение

**Для цитирования:** Использование программного комплекса Scales при планировании тактики хирургического лечения пациентов с дегенеративным спондилолистезом поясничных позвонков / М. А. Герасименко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. мед. навук. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 289–298. <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2023-20-4-289-298>

Mikhail A. Gerasimenko<sup>1</sup>, Andrey N. Mazurenko<sup>1</sup>, Sergey V. Makarevich<sup>1</sup>, Pavel S. Remov<sup>1</sup>, Maksim A. Kostsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Republican Scientific and Practical Center of Traumatology and Orthopedics, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

## USE OF THE SCALES SOFTWARE COMPLEX IN PLANNING THE SURGICAL TREATMENT OF PATIENTS WITH LUMBAR DEGENERATIVE SPONDYLOLISTHESIS

**Abstract.** The aim of the study was to develop a virtual software package that, when it is based on personalized indicators, allows planning surgical tactics and performing differentiated treatment of patients with degenerative lumbar spondylolisthesis.

The results of surgical treatment of retrospective group patients were the basis for creation of a virtual complex.

A virtual software package has been developed. It is an expert system for making decisions about surgical tactics for patients with lumbar degenerative spondylolisthesis. The operation of the program is based on the automated analysis of a given list of input parameters. The core of the virtual complex is represented by two configurations, one of which contains an artificial neural network. As a result of virtual processing of the patient's individual parameters, the program gives an answer in

the form of two color scales with numerical labels: a scale of differentiated choice between isolated decompression and decompression supplemented with posterior fusion; scales for a differentiated choice between laminectomy supplemented with medial facetectomy and bilateral decompression of the spinal canal from a unilateral approach. Using the developed software package, surgical treatment of 26 patients with lumbar degenerative spondylolisthesis was performed.

The Scales virtual complex, based on key general somatic and clinical and radiological parameters of a patient, creates an opportunity for a surgeon to make the most balanced and informed decision on the tactics of surgical treatment of lumbar degenerative spondylolisthesis. A personalized approach, accompanied by artificial intelligence technology, is aimed at reducing the likelihood of tactical errors and long-term complications of surgical interventions. The use of color scales with digital labels makes it possible to simplify the process of preoperative planning and to create conditions for achieving a balance between the decision of the program and the individual opinion of a specialist surgeon. The result of differentiated treatment of a group of patients using a virtual system was a significant and statistically significant ( $p < 0.001$ ) improvement in the life quality of operated patients in the long-term period.

**Keywords:** spondylolisthesis, software package, neural network, input parameters, differentiated treatment

**For citation:** Gerasimenko M. A., Mazurenko A. N., Makarevich S. V., Remov P. S., Kostsov M. A. Use of the Scales software complex in planning the surgical treatment of patients with lumbar degenerative spondylolisthesis. *Vestsi Natsyyanal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya medytsynskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Medical series*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 289–298 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2023-20-4-289-298>

**Введение.** Выбор оптимальной тактики хирургического лечения дегенеративного спондилолистеза на поясничном уровне – один из сложных и актуальных вопросов современной вертебрологии [1–3]. На сегодняшний день отсутствует консенсус относительно показаний к использованию заднего спондилодеза, а диагностические критерии спинальной нестабильности остаются неоднозначными [4].

Вместе с тем именно тактические ошибки при выборе того или иного типа хирургического вмешательства являются весомой причиной неудовлетворительных отдаленных исходов, таких как послеоперационная нестабильность и «болезнь неудачно оперированного позвоночника» [5]. Для решения существующих в хирургии дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника проблем активно используются CAS-технологии (computer assisted surgery). К ним относятся 3D-визуализация, моделирование, экспертные системы и алгоритмы принятия решений. Виртуальные системы предоперационного планирования, основанные на учете персонифицированных показателей пациента, – перспективное направление как в цифровой индустрии в целом, так и в спинальной хирургии [6, 7].

За последнее десятилетие увеличилось количество публикаций, в которых описываются системы поддержки принятия решений, основанные на элементах искусственного интеллекта, включая машинное обучение и нейронные сети [8, 9]. Несмотря на интенсивное развитие технологий, на сегодняшний день не существует виртуальной системы, позволяющей оценивать степень необходимости выполнения заднего спондилодеза при дегенеративном спондилолистезе поясничных позвонков.

Для решения поставленных задач на предыдущей стадии исследования нами была предложена экспертная математическая система принятия решения о хирургической тактике при поясничных дорсопатиях [10]. Дальнейшим этапом работы стала трансформация математической модели в виртуальный комплекс, основанный на применении искусственного интеллекта.

Цель исследования – разработка виртуального программного комплекса, позволяющего на основе персонифицированных показателей осуществлять планирование хирургической тактики и выполнять дифференцированное лечение пациентов с дегенеративным спондилолистезом поясничных позвонков.

**Объекты и методы исследования.** Объектами для создания ядра виртуального комплекса, представленного в работе, являлись пациенты ретроспективной группы ( $n = 178$ ), оперированные по поводу дегенеративного поясничного спондилолистеза на базе нейрохирургических отделений РНПЦ травматологии и ортопедии в период с 2017 по 2022 г. На этапе исследования, предшествовавшем разработке программы, нами изучены корреляционные показатели между клиническими и спондилометрическими параметрами. Установлено влияние исходных индивидуальных параметров пациентов с дегенеративным поясничным спондилолистезом на отдаленный исход [11].

Проспективную группу составили 26 пациентов, которым выполнялось дифференцированное хирургическое лечение с использованием нового виртуального комплекса.

В исследование включены случаи дегенеративного спондилолистеза поясничных позвонков I степени (по классификации Н. W. Meyerding). Исключены случаи дегенеративного спондилолистеза в комбинации с деформациями позвоночника, случаи латеролистеза. В ходе оценки отдаленных результатов хирургического лечения учитывали следующие параметры: интенсивность болевого синдрома в поясничном отделе позвоночника (ПОП) и в ногах по визуальной аналоговой шкале (ВАШ), качество жизни пациентов с использованием анкеты Освестри. При определении выраженности болевого синдрома учитывали дооперационные, ранние и поздние послеоперационные показатели, в то время как качество жизни изучали в дооперационном и позднем послеоперационном периоде. Для инструментальной диагностики отдаленных осложнений и последствий хирургического лечения использовали рентгеновскую компьютерную (РКТ) и магнитно-резонансную (МРТ) томографию, а также функциональную рентгенографию ПОП.

Статистическую обработку выполняли с помощью программы Statistica 10.0. Для изучения нормальности распределения количественных данных применяли тест Шапиро–Уилка. Если исследованные параметры не соответствовали закону нормального распределения, использовали непараметрические методы. Количественные данные представлены в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха [25-й (LQ); 75-й (UQ) перцентили]. При сравнении показателей в до- и послеоперационном периоде использовали тест Вилкоксона. Критический уровень значимости, принятый при проверке статистических гипотез, –  $p < 0,05$ . Для расчета доверительного интервала (ДИ, 95 %) частоты встречаемости исследуемых признаков применяли метод Вальда.

**Результаты исследования.** Результатом исследования стало создание программного виртуального комплекса Scales («Шкалы»), представляющего собой экспертную систему принятия решения о хирургической тактике для пациентов с дегенеративным спондилолистезом поясничных позвонков. Работа программы основана на учете индивидуальных клинических и спондилометрических показателей пациента, составляющих единый комплекс входных параметров. При обработке входных данных виртуальный алгоритм дает ответ о типе необходимого хирургического вмешательства в каждом конкретном случае. Базой для создания ядра виртуального комплекса являются отдаленные результаты хирургического лечения пациентов ретроспективной группы.

При разработке виртуального комплекса использовали языки программирования Python и R (среды Jupiter Notebook и RStudio соответственно), а также подсистемы построения клиентских приложений Windows Presentation Foundation в составе программной платформы NET Framework версии 4.5.2. Учитывая тот факт, что сбор данных и оценка результатов хирургического лечения ретроспективной группы продолжаются, на данном этапе нами предложено две конфигурации рабочего ядра программы: одна содержит нейронную сеть, вторая – математическую основу с набором индивидуальных весов для каждого из параметров.

В ходе исследования создана искусственная нейронная сеть, представленная многослойным перцептроном с наличием у каждого нейрона сигмоидной функции активации. При определении значимости входных параметров и оценке их влияния на риск прогрессирования спинальной нестабильности применяли метод логистической регрессии. Соотношение выборки для обучения и тестовой выборки – 1 : 1. Программа содержит набор автоматизированных модульных тестов, использующих библиотеки тестирования XUnit и Moq. При разработке рабочих окон виртуального комплекса задействован пользовательский интерфейс Todo. Параметры проверяются на валидность согласно заданным рамкам. При использовании математической конфигурации ядра программы для каждого из показателей назначается фиксированный набор весов для вычисления индивидуальной оценки.

Все входные параметры, вносимые в рабочее окно виртуального комплекса, разделены на основные (общесоматические, клиничко-рентгенологические, хирургические) и дополнительные.

**Общесоматические параметры.** В перечень общесоматических параметров включены пол, возраст пациента, индекс массы тела, наличие регулярных вредных привычек (выкуривание более двух сигарет в неделю, употребление алкоголя более чем 2 раза в неделю). Кроме этого, при анализе общесоматических показателей учитывается наличие или отсутствие следующих нозологических форм (в скобках указаны шифры по МКБ-10):

сахарный диабет (E10–E14);  
 ревматические болезни (I00–I02, I05–I09, M30–M36, M79.0);  
 хронические болезни ЖКТ (K25, K27, K74);  
 хронические болезни дыхательной системы (J44, J45);  
 хронические болезни почек (N00–N08);  
 хронические болезни сердца (I20–I25);  
 цереброваскулярные болезни (I60–I64);  
 злокачественные новообразования (C00–C97);  
 болезни крови и кроветворных органов (D50–D89);  
 психические расстройства и расстройства поведения (F00–F99);  
 болезни нервной системы (G00–G99), при условии наличия стойкого неврологического дефицита и нарушения самообслуживания пациента.

**Клинико-рентгенологические параметры.** Данная группа показателей включает наличие и степень выраженности у пациента люмбалгии и нейрогенной перемежающейся хромоты, а также ряд рентгенологических параметров, для оценки которых необходимо проведение РКТ, МРТ и функциональной рентгенографии ПОП. В перечень спондилографических показателей включены:

ангуляция – угол между двумя линиями, проводимыми параллельно нижней замыкательной пластинке вышележащего позвонка и верхней замыкательной пластинке нижележащего позвонка;  
 трансляция – разница между линейным смещением вышележащего позвонка в положения флексии и экстензии;

среднее линейное смещение – среднее арифметическое значение между линейным смещением вышележащего позвонка в положениях флексии, экстензии и в нейтральном положении;

факт наличия или отсутствия снижения высоты межпозвонкового диска;

наличие и конфигурация вентральных спондилофитов;

факт наличия или отсутствия «вакуум-феномена» в заинтересованном межпозвонковом диске;  
 средняя плотность костной ткани в заданных точках по ходу планируемой траектории транспедикулярного винта;

фасеточный угол, измеряемый в заинтересованном позвоночно-двигательном сегменте с двух сторон (факт наличия или отсутствия тропизма дугоотростчатых суставов определяется программой автоматически).

Рабочее окно виртуального комплекса с внесенными клинико-рентгенологическими параметрами представлено на рис. 1.

**Хирургические параметры.** К данной группе показателей относятся:

количество уровней, требующих декомпрессии невральных структур;

количество дугоотростчатых суставов, в которых объем необходимой резекции суставных отростков превышает 1/3 от всей ширины сустава.

**Дополнительные параметры.** В перечень дополнительных параметров включены:

кранио-каудальная протяженность стенозированного участка, соответствующего зоне декомпрессии;

глубина хирургического доступа (расстояние от уровня кожи до основания остистого отростка);


значение межсуставного связочного сагиттального размера позвоночного канала в точке наибольшей компрессии дурального мешка;

значение переднезаднего сагиттального размера позвоночного канала в точке наибольшей компрессии дурального мешка;

конфигурация остистого отростка (факт наличия или отсутствия его отклонения в сторону, противоположную стороне наибольших клинических проявлений);

факт наличия одностороннего корешкового или корешково-сосудистого синдрома при полном отсутствии клинических проявлений на противоположной стороне.

После ввода индивидуальных параметров пациента в рабочее окно программы виртуальный алгоритм проводит автоматическую обработку данных и представляет результаты обработки



Файл Настройки

✱ - □ ×

### Клинико-рентгенологические факторы

**Выраженность нейрогенной перемежающей хромоты**

Есть  Нет  +-

Линейное смещение во флексии  +-

Линейное смещение в экстензии  +-

Линейное смещение в нейтральном положении  +-

Ангуляция  +-

"Вакуумен-феномен" по данным РКТ  Есть  Нет

Количество фасеточных суставов, требующих резекции более 1/3 ширины сустава  +-

Фасеточный угол П  +- Л  +-

**Характеристика диска и вентрального спондилеза (тип)**

<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
1	2	3	4	5	6
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7	8	9	10	11	12

Назад
Далее

Рис. 1. Рабочее окно программы с внесенными клинико-рентгенологическими параметрами  
 Fig. 1. Working window of the program with the introduced clinical and radiological parameters

в виде двух цветовых шкал с числовыми метками. Шкала № 1 (шкала дифференцированного выбора между изолированной декомпрессией и декомпрессией, дополненной задним спондилезом) отражает степень необходимости транспедикулярной фиксации (при необходимости дополненной межтеловым спондилезом) в заинтересованном позвоночно-двигательном сегменте. Верхняя часть шкалы соответствует задней декомпрессии без фиксации, нижняя часть – задней декомпрессии, дополненной спондилезом.

В случае, если шкала № 1 указывает на необходимость выполнения изолированной декомпрессии без спондилеза, в рабочее окно программы вносятся дополнительные параметры, после чего осуществляется второй этап автоматической обработки данных. При этом в работу включается шкала № 2 – шкала дифференцированного выбора между ламинэтомией, дополненной медиальной фасетэктомией, и двусторонней декомпрессией позвоночного канала из одностороннего доступа. Верхняя часть шкалы соответствует двусторонней декомпрессии из одностороннего доступа, нижняя – ламинэтомии.

Таким образом, предоперационное планирование хирургической тактики при дегенеративном спондилолистезе поясничных позвонков с использованием искусственного интеллекта осуществляется в два этапа. На первом этапе (шкала № 1) в ходе автоматического анализа учитываются только общесоматические, клинико-рентгенологические и хирургические параметры, на втором этапе (шкала № 2) – дополнительные параметры, а также некоторые из основных показателей. Общий вид цветowych шкал в рабочем окне виртуального комплекса показан на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид цветowych шкал в рабочем окне программного комплекса  
Fig. 2. General view of the color scales in the working window of the software package

Инновационный подход при планировании хирургического лечения дегенеративного спондилолистеза позволяет осуществлять дифференцированный выбор между следующими методиками:

малоинвазивная точечная двусторонняя декомпрессия, выполняемая из одностороннего доступа;

задняя декомпрессия в объеме ламинэктомии, дополненной двусторонней медиальной фасетэктомией;

задняя декомпрессия, дополненная транспедикулярной фиксацией и, при необходимости, межтеловым спондилодезом.

С использованием разработанного виртуального комплекса на базе нейрохирургических отделений РНПЦ травматологии и ортопедии проведено дифференцированное хирургическое лечение 26 пациентов с дегенеративным поясничным спондилолистезом. В 10 случаях, согласно

решению программы, выполнялась задняя декомпрессия (в объеме ламинэктомии в комбинации с двусторонней медиальной фасетэктомией), дополненная спондилезом. В 11 случаях проводилась ламинэктомия без спондилеза. Двусторонняя декомпрессия из одностороннего доступа применялась, согласно данным предоперационного планирования, в 5 случаях.

Показатели интенсивности болевого синдрома и качества жизни оперированных пациентов представлены в таблице.

Отдаленные результаты хирургического лечения, Me (25-й (LQ); 75-й (UQ) перцентили)

Long-term surgical treatment results, Me (25th (LQ); 75th (UQ) percentiles)

Показатель	До операции (1)	В день выписки из стационара (2)	В отдаленном периоде (3)	Тест Вилкоксона, попарное сравнение, значимость
Интенсивность боли в ПОП (по ВАШ), баллы	7,0 [6,0; 8,0]	3,8 [2,8; 5,0]	3,0 [2,0; 3,0]	$p_{1-2} < 0,001$ $p_{2-3} < 0,001$ $p_{1-3} < 0,001$
Интенсивность боли в ногах (по ВАШ), баллы	7,3 [6,0; 8,1]	2,5 [2,0; 4,0]	2,0 [1,0; 3,0]	$p_{1-2} < 0,001$ $p_{2-3} = 0,061$ $p_{1-3} < 0,001$
Индекс Освестри, %	54,0 [45,1; 62,0]	–	22,0 [16,0; 30,1]	$p_{1-3} < 0,001$

Как видно из данных таблицы, в позднем послеоперационном периоде у пациентов проспективной группы отмечалась существенная и статистически значимая ( $p < 0,001$ ) регрессия болевого синдрома по сравнению с дооперационным периодом. Медиана индекса Освестри в отдаленном периоде составила 22,0 [16,0; 30,1] %, что является высоким показателем и подтверждает эффективность дифференцированного хирургического лечения спондилолистеза поясничных позвонков с применением виртуального программного комплекса.

В ходе анализа спондилометрических показателей в позднем послеоперационном периоде установлено, что при использовании задней декомпрессии без спондилеза (в объеме ламинэктомии) у 1 из 11 пациентов имеется увеличение линейного смещения вышележащего позвонка без признаков клинического ухудшения, а еще в одном случае отмечается усиление болевого синдрома, ассоциированное (по данным нейровизуализации) с выраженным рубцово-спаечным процессом в зоне декомпрессии невралных структур.

**Обсуждение.** Интенсивное развитие медицины и насыщенный поток этиопатогенетических данных диктуют необходимость создания новых методов обработки стартовых клинических и инструментальных показателей пациента [6, 8, 12]. В настоящее время активно разрабатываются системы поддержки принятия решений – программы, осуществляющие сбор и обработку индивидуальных параметров пациента. Современные виртуальные комплексы, включая технологию нейронных сетей, позволяют проводить автоматический интеллектуальный анализ и становятся все более популярными и востребованными в сфере хирургии [13, 14].

В 2021 г. российскими учеными В. А. Бывальцевым и А. А. Калининым была предложена система принятия решения о тактике при дегенеративно-дистрофических заболеваниях поясничного отдела позвоночника. Согласно представленным авторами данным, с использованием программы успешно выполнено 59 хирургических вмешательств с применением методик тотальной артропластики, заднего минимально инвазивного и косоугольного межтелового спондилеза [15]. А. Wiggins с соавт. (2021 г.) была применена технология машинного обучения, которая позволила прогнозировать параметры качества жизни пациентов после удаления грыж межпозвоночных дисков на поясничном уровне [16]. Исследование А. Campagner с соавт. (2020 г.) продемонстрировало эффективность машинного обучения при прогнозировании результатов заднего спондилеза на основе показателей инвазивности вмешательства и дооперационных воспалительных маркеров [17].

В 2019 г. группой белорусских исследователей были опубликованы данные о создании математической модели планирования лечебной тактики для пациентов с остеохондрозом. Модель

включает автоматизированный сбор показателей пациента, определение степени выраженности дегенеративно-дистрофического процесса и классификацию, позволяющую определить вектор оказания специализированной помощи [18].

В целом необходимость разработки новых систем автоматизированного анализа данных в вертебрологии возрастает [9, 15]. В то же время, несмотря на востребованность методик искусственного интеллекта, их применение в области хирургии дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника является ограниченным. Доказательная база эффективности и безопасности использования машинного обучения в спинальной нейрохирургии является недостаточной [19].

Разработанный нами программный комплекс представляет собой автоматизированную экспертную систему принятия решения. Ядро программы базируется на опыте хирургического лечения ретроспективной группы, а также на применении современных методик статистического анализа (включая логистическую регрессию), позволивших создать корреляционную матрицу. Виртуальная система соответствует современным тенденциям развития хирургии позвоночника, где принципиальное значение имеет предоперационная подготовка, основанная на дифференцированном подходе и учете индивидуальных показателей пациента [20]. Программа не имеет аналогов, является простой в эксплуатации, может быть использована врачами-нейрохирургами и травматологами-ортопедами, оказывающими специализированную помощь пациентам с дегенеративным спондилолистезом поясничных позвонков.

**Заключение.** Разработанный виртуальный комплекс, основанный на учете ключевых общесоматических и клиничко-рентгенологических показателей пациента, создает возможность для принятия хирургом максимально взвешенного и обоснованного решения по тактике хирургического лечения дегенеративного спондилолистеза на поясничном уровне. Мы полагаем, что сочетание персонифицированного подхода и технологии искусственного интеллекта позволит снизить вероятность тактических ошибок и отдаленных осложнений после хирургических вмешательств. Цветовые шкалы с числовыми метками обеспечивают наглядную демонстрацию степени необходимости того или иного типа хирургического лечения. Их использование позволяет упростить процесс предоперационного планирования и создать условия для достижения баланса между решением программы и индивидуальным мнением специалиста-хирурга. Результатом дифференцированного лечения группы пациентов с использованием виртуальной системы Scales стало существенное и статистически значимое ( $p < 0,001$ ) улучшение качества жизни оперированных пациентов в отдаленном периоде. Однако для более полной оценки эффективности предложенного виртуального комплекса необходимы дальнейшие исследования с большим числом пациентов и более продолжительным сроком наблюдения.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Список использованных источников

1. A narrative review of lumbar fusion surgery with relevance to chiropractic practice / C. J. Daniels [et al.] // *J. Chiropr. Med.* – 2016. – Vol. 15, N 4. – P. 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.08.007>
2. Reid, P. C. State of the union: a review of lumbar fusion indications and techniques for degenerative spine disease: JNSPG 75th anniversary invited review article / P. C. Reid, S. Morr, M. G. Kaiser // *J. Neurosurg.: Spine.* – 2019. – Vol. 31, N 1. – P. 1–14. <https://doi.org/10.3171/2019.4.SPINE18915>
3. Оконешникова, А. К. Выбор тактики хирургического лечения пациентов с дегенеративными заболеваниями нижнепоясничного отдела позвоночника с учетом индивидуальных параметров дугоотростчатых суставов : дис. ... канд. мед. наук : 14.01.18 / А. К. Оконешникова. – Новосибирск, 2019. – 187 с.
4. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF / R. J. Mobbs [et al.] // *J. Spine Surg.* – 2015. – Vol. 31, N 1. – P. 2–18. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05>
5. Decompression with or without concomitant fusion in lumbar stenosis due to degenerative spondylolisthesis: a systematic review / M. L. Dijkerman [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2018. – Vol. 27. – P. 1629–1643. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5436-5>
6. Борщенко, И. А. Использование современных методов математического интеллектуального анализа данных для получения алгоритма минимально-инвазивного хирургического лечения дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника / И. А. Борщенко, Я. А. Борщенко, А. В. Басков // *Вертебрология в России: итоги и перспективы развития : сб. материалов V съезда хирургов-вертебрологов России, Саратов, 23–24 мая 2014 г. / Сарат. науч.-исслед. ин-т травматологии и ортопедии ; редкол. : Д. М. Пучиньян [и др.]. – Саратов, 2014. – С. 38–40.*



7. Компьютерная программа для анализа цифровых МРТ пояснично-крестцового отдела позвоночника / Н. Е. Комлева [и др.] // Вестн. новых мед. технологий. – 2012. – Т. 19, № 1. – С. 192–195.
8. Artificial intelligence-enhanced intraoperative neurosurgical workflow: current knowledge and future perspectives / L. Tariciotti [et al.] / *J. Neurosurg. Sci.* – 2022. – Vol. 66, N 2. – P. 139–150. [10.23736/S0390-5616.21.05483-7](https://doi.org/10.23736/S0390-5616.21.05483-7)
9. Machine learning applications to clinical decision support in neurosurgery: an artificial intelligence augmented systematic review / Q. Buchlak [et al.]. // *Neurosurg. Rev.* – 2020. – Vol. 43, N 5. – P. 1235–1253. <https://doi.org/10.1007/s10143-019-01163-8>
10. Ремов, П. С. Определение хирургической тактики при поясничных дорсопатиях с использованием программного обеспечения / П. С. Ремов, А. Н. Мазуренко, С. В. Макаревич // *Traum. Orthop. Kazakhstan.* – 2021. – N 58 (Special iss.). – P. 53–55.
11. Сравнительный анализ отдаленных результатов хирургического лечения дегенеративного спондилолистеза на поясничном уровне / П. С. Ремов [и др.] // *Здравоохранение.* – 2022. – № 9. – С. 51–58.
12. Смартфон-ассистированная технология дополненной реальности при предоперационном планировании в хирургии позвоночника / Е. В. Ковалев [и др.] // *Хирургия позвоночника.* – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 94–99.
13. Lee, S. H. Comparison of clinical and radiological outcomes after automated open lumbar discectomy and conventional microdiscectomy: a prospective randomized trial / S. H. Lee, J. S. Bae // *Int. J. Clin. Exp. Med.* – 2015. – Vol. 8, N 8. – P. 12135–12148.
14. Горбачев, С. В. Нейро-нечеткие методы в интеллектуальных системах обработки и анализа многомерной информации / С. В. Горбачев, В. И. Сырякин. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2014. – 442 с.
15. Бывальцев, В. А. Оценка эффективности системы поддержки принятия решений в спинальной нейрохирургии для персонализированного использования минимально-инвазивных технологий на поясничном отделе позвоночника / В. А. Бывальцев, А. А. Калинин // *Соврем. технологии в медицине.* – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 13–23.
16. Artificial intelligence facilitates decision making in the treatment of lumbar disc herniations / A. Wirries [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2021. – Vol. 30, N 8. – P. 2176–2184. <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06613-2>
17. Assessment and prediction of spine surgery invasiveness with machine learning techniques / A. Campagner [et al.] // *Comput. Biol. Med.* – 2020. – Vol. 121. – Art. 103796. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103796>
18. Масалитина, Н. Н. Математическая модель принятия решений при лечении остеохондроза поясничного отдела позвоночника / Н. Н. Масалитина, К. С. Курочка, Е. Л. Цитко // *Информатика.* – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 24–35.
19. Реброва, О. Ю. Жизненный цикл система поддержки принятия решений как медицинских технологий / О. Ю. Реброва // *Врач и информ. технологии.* – 2020. – № 1. – С. 27–37.
20. Разработка алгоритма клинично-инструментальной диагностики некомпрессионных поясничных болевых синдромов для оптимизации использования пункционных хирургических методик / А. А. Калинин [и др.] // *Иннов. медицина Кубани.* – 2020. – № 4. – С. 27–34.

## References

1. Daniels C. J., Wakefield P. J., Bub G. A., Toombs J. D. A narrative review of lumbar fusion surgery with relevance to chiropractic practice. *Journal of Chiropractic Medicine*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.08.007>
2. Reid P. C., Morr S., Kaiser M. G. State of the union: a review of lumbar fusion indications and techniques for degenerative spine disease: JNSPG 75th anniversary invited review article. *Journal of Neurosurgery: Spine*, 2019, vol. 31, no. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.3171/2019.4.SPINE18915>
3. Okoneshnikova A. K. *Choice of tactics of surgical treatment patients with degenerative diseases of the lower lumbar spine, taking into account the individual parameters of the facet joints.* Ph. D. Thesis. Novosibirsk, 2019. 187 p.
4. Mobbs R. J., Phan K., Malham G., Seex K., Rao P. J. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. *Journal of Spine Surgery*, 2015, vol. 31, no. 1, pp. 2–18. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05>
5. Dijkerman M. L., Overvest G. M., Moojen W. A., Vleggeert-Lankamp C. L. Decompression with or without concomitant fusion in lumbar stenosis due to degenerative spondylolisthesis: a systematic review. *European Spine Journal*, 2018, vol. 31, pp. 1629–1643. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5436-5>
6. Borshhenko I. A., Borshchenko Ja. A., Baskov A. V. The use of modern methods of mathematical data mining to obtain an algorithm for minimally invasive surgical treatment of degenerative diseases of the lumbar spine. *Vertebrologiya v Rossii: itogi i perspektivy razvitiya: V s'ezd khirurgov-vertebrologov Rossii (23–24 maya 2014 goda, Saratov): sbornik materialov* [Vertebrology in Russia: results and development prospects: V congress of vertebral surgeons of Russia (May 23–24, 2014, Saratov): collection of materials]. Saratov, 2014, pp. 38–40 (in Russian).
7. Komleva N. E., Daurov S. K., Bol'shakov A. A., Glazkov V. P., Bakutkin V. V., Mar'yanovskii A. A. Computer programme for analyzing digital magnetic resonance tomography of lumbosacral part of spine. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii* [Bulletin of new medical technologies], 2012, vol. 19, no. 1, pp. 192–195 (in Russian).
8. Tariciotti L., Palmisciano P., Giordano M., Remoli G., Lacorte E., Bertani G., Locatelli M., Dimeco F., Caccavella V. M., Prada F. Artificial intelligence-enhanced intraoperative neurosurgical workflow: current knowledge and future perspectives. *Journal of Neurosurgical Sciences*, 2022, vol. 66, no. 2, pp. 139–150. <https://doi.org/10.23736/S0390-5616.21.05483-7>
9. Buchlak Q. D., Esmaili N., Leveque J.-C., Farrokhi F., Bennett C., Piccardi M., Sethi R. K. Machine learning applications to clinical decision support in neurosurgery: an artificial intelligence augmented systematic review. *Neurosurgical Review*, 2020, vol. 43, no. 5, pp. 1235–1253. <https://doi.org/10.1007/s10143-019-01163-8>

10. Remov P. S., Mazurenko A. N., Makarevich S. V. Determination of surgical tactics for lumbar dorsopathies using software. *Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan*, 2021, no. 58 (Special issue), pp. 53–55 (in Russian).
11. Remov P. S., Mazurenko A. N., Makarevich S. V., Chumak N. A., Pustovoitov K. V. Comparative analysis of long-term results of surgical treatment of degenerative spondylolisthesis at the lumbar level. *Zdravookhranenie* [Healthcare], 2022, no. 9, pp. 51–58 (in Russian).
12. Kovalev E. V., Kirilenko S. I., Mazurenko A. N., Filyustin A. E., Dubrovskii V. V. Smartphone-assisted augmented reality technology for preoperative planning in spinal surgery. *Khirurgiya pozvonochnika* [Spine surgery], 2021, vol. 18, no. 3, pp. 94–99 (in Russian).
13. Lee S. H., Bae J. S. Comparison of clinical and radiological outcomes after automated open lumbar discectomy and conventional microdiscectomy: a prospective randomized trial. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 2015, vol. 8, no. 8, pp. 12135–12148.
14. Gorbachev S. V., Syryamkin V. I. *Neuro-fuzzy methods in intelligent systems of processing and analysis of multi-dimensional information*. Tomsk, Tomsk University Publishing House, 2014. 442 p. (in Russian).
15. Byval'tsev V. A., Kalinin A. A. Evaluation of the effectiveness of a decision support system in spinal neurosurgery for personalized use of minimally invasive technologies in the lumbar spine. *Sovremennye tekhnologii v meditsine* [Modern technologies in medicine], 2021, vol. 13, no. 5, pp. 13–23 (in Russian).
16. Wirries A., Geiger F., Hammad A., Oberkircher L., Blümcke I., Jabari S. Artificial intelligence facilitates decision making in the treatment of lumbar disc herniations. *European Spine Journal*, 2021, vol. 30, no. 8, pp. 2176–2184. <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06613-2>
17. Campagner A., Berjano P., Lamartina C., Langella F., Lombardi G., Cabitza F. Assessment and prediction of spine surgery invasiveness with machine learning techniques. *Computers in Biology and Medicine*, 2020, vol. 121, art. 103796. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103796>
18. Masalitina N. N., Kurochka K. S., Tsitko E. L. Mathematical model of decision making in the treatment of osteochondrosis of the lumbar spine. *Informatika* [Informatics], 2019, vol. 16, no. 1, pp. 24–37 (in Russian).
19. Rebrova O. Ju. Life cycle of a decision support system as medical technologies. *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and information technology], 2020, no. 1, pp. 27–37 (in Russian).
20. Kalinin A. A., Okoneshnikova A. K., Pestryakov Yu. Ya., Shepelev V. V., Byval'tsev V. A. Development of an algorithm for clinical and instrumental diagnosis of non-compressive lumbar pain syndromes to optimize the use of puncture surgical techniques. *Innovatsionnaya meditsina Kubani* [Innovative medicine of Kuban], 2020, no. 4, pp. 27–34 (in Russian).

### Информация об авторах

*Герасименко Михаил Александрович* – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, директор. Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии (ул. Кижеватова, 60/4, 220024, г. Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9151-0214>. E-mail: [kanc@ortoped.by](mailto:kanc@ortoped.by)

*Мазуренко Андрей Николаевич* – канд. мед. наук, доцент, заведующий отделением. Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии (ул. Кижеватова, 60/4, 220024, г. Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-4883-5598>. E-mail: [mazurenko@mail.ru](mailto:mazurenko@mail.ru)

*Макаревич Сергей Валентинович* – д-р мед. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии (ул. Кижеватова, 60/4, 220024, г. Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-8225-4423>. E-mail: [sv.mak@mail.ru](mailto:sv.mak@mail.ru)

*Ремов Павел Сергеевич* – мл. науч. сотрудник. Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии (ул. Кижеватова, 60/4, 220024, г. Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-6060-5720>. E-mail: [neuro\\_ugokb2013@mail.ru](mailto:neuro_ugokb2013@mail.ru)

*Косцов Максим Антонович* – студент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, г. Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9821-7344>. E-mail: [kostsov.00@mail.ru](mailto:kostsov.00@mail.ru)

### Information about the authors

*Mikhail A. Gerasimenko* – Corresponding Member, D. Sc. (Med.), Professor, Director. Republican Scientific and Practical Center of Traumatology and Orthopedics (60/4, Kizhevatov Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9151-0214>. E-mail: [kanc@ortoped.by](mailto:kanc@ortoped.by)

*Andrey N. Mazurenko* – Ph. D. (Med.), Associate Professor, Head of the Department. Republican Scientific and Practical Center of Traumatology and Orthopedics (60/4, Kizhevatov Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-4883-5598>. E-mail: [mazurenko@mail.ru](mailto:mazurenko@mail.ru)

*Sergey V. Makarevich* – D. Sc. (Med.), Associate Professor, Chief Researcher. Republican Scientific and Practical Center of Traumatology and Orthopedics (60/4, Kizhevatov Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-8225-4423>. E-mail: [sv.mak@mail.ru](mailto:sv.mak@mail.ru)

*Pavel S. Remov* – Junior Researcher. Republican Scientific and Practical Center of Traumatology and Orthopedics (60/4, Kizhevatov Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-6060-5720>. E-mail: [neuro\\_ugokb2013@mail.ru](mailto:neuro_ugokb2013@mail.ru)

*Maksim A. Kostsov* – student. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhynski Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9821-7344>. E-mail: [kostsov.00@mail.ru](mailto:kostsov.00@mail.ru)