

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)
УДК 004.942 + 004.891

Поступила в редакцию 12.04.2018
Received 12.04.2018

Принята к публикации 18.10.2018
Accepted 18.10.2018

Математическая модель принятия решений при лечении остеохондроза поясничного отдела позвоночника

Н. Н. Масалитина^{1✉}, К. С. Курочка¹, Е. Л. Цитко²

¹Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
Гомель, Беларусь

✉E-mail: masalitina@rambler.ru

²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты формализации логики принятия решений о выборе общего направления лечения остеохондроза позвоночника – консервативной или оперативной схемы лечения. Выделены симптомы заболевания, определяющие необходимость применения различных методов лечения. Построена математическая модель, описывающая состояние одного позвоночно-двигательного сегмента поясничного отдела позвоночника под воздействием дегенеративно-дистрофического процесса и позволяющая выполнить классификацию (распознавание) состояний позвоночника, которые требуют принципиально различных схем лечения. Выявлены ключевые дескрипторы, необходимые для описания логики принятия решений при диагностике и выборе направления лечения поясничного остеохондроза. Выделены решения, поддающиеся полной и частичной автоматизации.

Ключевые слова: математическая модель, поддержка принятия решения, классификация, распознавание образов, автоматизированная диагностика, остеохондроз, дегенеративно-дистрофические заболевания, поясничный отдел позвоночника

Для цитирования. 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.

The mathematic model of lumbar spine osteochondrosis treatment decisions

Natalia N. Masalitina^{1✉}, Konstantin S. Kurochka¹, Evgeniy L. Tsitko²

¹Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus

✉E-mail: masalitina@rambler.ru

²Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

Abstract. The results of formalization of the decision-making logics in a field of osteochondrosis treatment are presented. The symptoms of the disease, determining the need for various methods of therapy, are selected. The mathematical model of lumbar spine state is developed. It allows to classify (recognize) spine states requiring principally different treatments. Key descriptors determining the choice of a conservative or operative intervention have been identified. Solutions that can be fully and partially automated are identified.

Key words: mathematical model, decision making support, classification, pattern recognition, automated diagnostics, osteochondrosis, degenerative-dystrophic diseases, lumbar spine

For citation. Masalitina N. N., Kurochka K. S., Tsitko E. L. The mathematic model of lumbar spine osteochondrosis treatment decisions. *Informatics*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 24–35 (in Russian).

Введение. Остеохондроз – одно из наиболее распространенных заболеваний поясничного отдела позвоночника, возникающее вследствие изменения упругоэластических свойств межпозвоночного диска под воздействием внешних деструктивных факторов (повышенных нагрузок, дефицита движения, нарушений обменных процессов и пр.) [1].

В настоящее время оценка состояния позвоночника выполняется на основе цифровых рентгеновских снимков, результатов компьютерной и магнитно-резонансной томографии. Однако эти ценные источники информации применяются не в полной мере, так как не существует достаточно развитых средств автоматизации анализа цифровых медицинских изображений. Компьютерная система используется только как средство хранения информации, а наиболее трудоемкий процесс оценки состояния пациента и постановки диагноза выполняет группа врачей. Процесс принятия решения о соответствии наблюдаемых у пациента признаков критериям диагностики остеохондроза, а также о составе корректирующих воздействий, необходимых для восстановления функций позвоночника, достаточно сложный по ряду причин.

Признаки остеохондроза являются неоднородными по форме представления информации. Клиническая картина этого заболевания складывается из очень разнообразных проявлений [2]. Дегенеративные изменения в позвоночно-двигательных сегментах оказывают воздействие на спинной мозг и нервы, что, в свою очередь, предопределяет влияние на функцию иннервируемых органов и систем. Следует отметить, что схожие симптомы могут быть следствием как дегенеративно-дистрофического поражения межпозвоночного диска, так и совершенно иных причин [1, 2]. Установить, чем обусловлена дорсалгия и другие клинические проявления остеохондроза (дегенеративными изменениями, протрузией или грыжей диска), достаточно сложно в силу того, что межпозвоночный диск не поддается непосредственному наблюдению и его состояние приходится оценивать на основе анализа косвенных признаков. Точность оценки этих признаков существенно зависит от качества используемых медицинских изображений и подготовки специалиста, выполняющего исследование.

Другим важным фактором, затрудняющим выбор способа лечения остеохондроза, является множественность возможных лечебных процедур и неоднозначность эффекта от них при различных видах поражения позвоночно-двигательного сегмента [2].

Очевидно, что каждая из перечисленных особенностей является потенциальным источником ошибок принятия решений в диагностике и выборе оптимальной тактики лечения. Формализация и автоматизация этих процессов позволят снизить неопределенность и количество неэффективных решений.

Вопросы повышения эффективности принятия решений о диагностике и лечении различных заболеваний с применением информационных систем решаются на основе табличных методов формализации алгоритмов принятия решения [3], методов логического проектирования [4], а также методов обработки изображений и машинного обучения [5, 6]. Однако все существующие средства автоматизации диагностики имеют узкую специализацию и не могут применяться для оценки состояния позвоночника без существенной модификации.

В настоящей статье представлены результаты математического моделирования логики принятия решения о состоянии поясничного отдела позвоночника, целью которого являются автоматизация процессов принятия решений на основе медицинских изображений с минимальным участием специалиста медицинского профиля, а также выявление решений, требующих организации автоматизированного диалога с врачом. Для этого выполнено формализованное описание правил выбора основного направления лечения дегенеративно-дистрофических заболеваний (оперативного или консервативного), а также выявления среди множества признаков заболевания наиболее значимых симптомов, определяющих патогенетически обоснованный и персонифицированный подход к лечению.

Описание объекта исследования. Остеохондроз поясничного отдела позвоночника является результатом сложного взаимодействия ряда существенно различных факторов и оказывает влияние на функционирование большого количества систем организма. Как следствие, проявления этого заболевания очень разнородны. К их числу относятся непосредственные признаки изменения свойств межпозвоночного диска: «высыхание» пульпозного ядра, разрыв волокон фиброзного кольца, выпячивание межпозвоночного диска (грыжа), разрыв волокон оболочек фиброзного кольца с выпячиванием ткани пульпозного ядра (секвестрация). В зависимости от

размера выпячивающейся области, а также присутствия признаков секвестрации принято выделять четыре стадии образования грыжи [7]. Первые признаки этого процесса не поддаются прямому наблюдению. Их наличие можно только предполагать, основываясь на анализе ряда косвенных признаков: жалоб, анамнестических и клинических признаков. Визуализация морфологических изменений диска на поздних стадиях возможна посредством компьютерной и (или) магнитно-резонансной томографии [8].

В силу того что межпозвоночный диск выполняет роль амортизирующей прослойки между телами позвонков, нарушение его упругоэластических свойств вызывает изменение взаимного расположения позвонков. Происходит сближение отдельных участков тел позвонков, выпрямление свойственного поясничному отделу позвоночника прогиба вперед (физиологического лордоза), изменение показателей трапецевидности межпозвоночного диска, высоты переднего и заднего отделов диска, а также углов между остистыми отростками. Эти изменения существенно превышают физиологическую норму вариации прогиба позвоночника при движении и смене положения тела, что свидетельствует о нарушении кинематики заинтересованного позвоночно-двигательного сегмента (рис. 1).

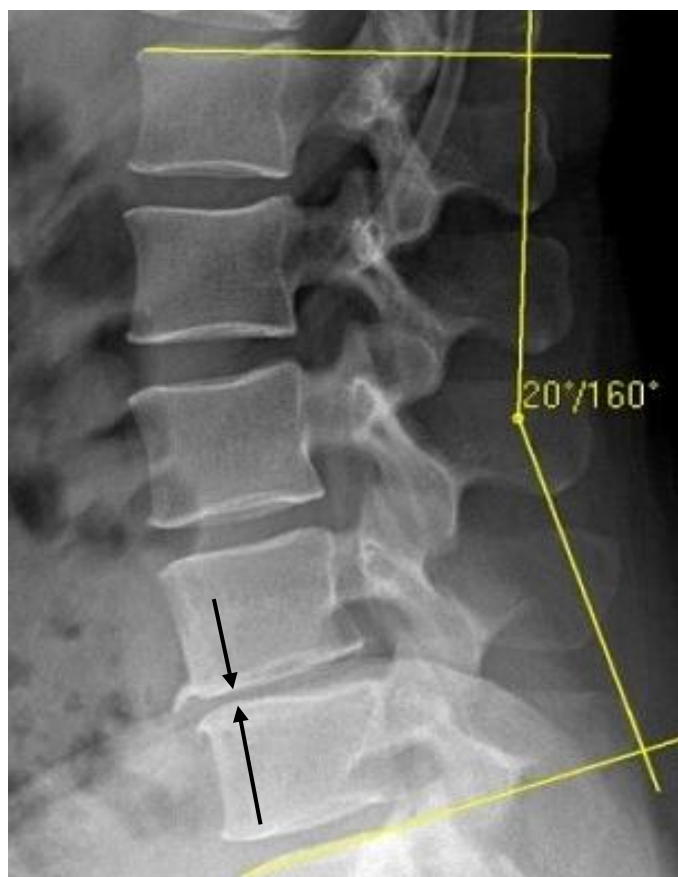


Рис. 1. Сглажен поясничный лордоз на фоне дегенеративного поражения диска L3-L4 (указано стрелками)

Прогрессирование дегенеративных изменений в двигательном сегменте приводит к его структурной нестабильности (гипермобильности), при которой выявляется патологическая подвижность одного позвонка по отношению к другому (рис. 2). При нормальном состоянии межпозвоночного диска таких изменений не наблюдается.

Следует отметить, что дегенеративно-дистрофическое поражение одного межпозвоночного диска вызывает изменение взаимного положения не только пары ближайших позвонков, но и ответную деформацию соседних позвоночно-двигательных сегментов.

Выделяют также ряд признаков дегенеративно-дистрофических заболеваний, которые являются следствием воздействия выпячивающихся участков межпозвоночного диска на структуры спинномозгового канала (корешок спинного мозга, кровеносные сосуды). Эти проявления очень разнообразны: возможны болевые ощущения различной интенсивности как в области позвоночника, так и иррадиирующего характера, часто определяется снижение отдельных рефлексов, онемение и нарушение подвижности конечности (радикулоишемия, радикулопатия).



Рис. 2. Нестабильность позвоночно-двигательного сегмента L5-S1, вызванная дегенеративно-дистрофическим процессом (антепозитивныйolistez первой степени L5-S1)

Кроме перечисленных нарушений следует отметить и проявления заболеваний, являющихся следствием действия адаптивных механизмов организма. К их числу относится сколиоз, который возникает вследствие напряжения мышц, стремящихся уменьшить давление на пораженный межпозвоночный диск и сократить подвижность соответствующего сегмента, чтобы минимизировать болевые проявления. Кроме того, происходит разрастание замыкательных пластин тел позвонков, образуются выросты, называемые остеофитами. Возможно также разрастание контактирующих поверхностей суставных отростков. Эти изменения направлены на увеличение площади соприкосновения соседних позвонков в целях компенсации нарушения опорной функции межпозвоночного диска, но при этом они могут стать дополнительным источником компрессии спинного мозга, нервов и кровеносных сосудов.

Вместе с перечисленными симптомами остеохондроза при принятии решения о состоянии позвоночника следует учитывать и размер (наибольший диаметр) спинномозгового канала. Хотя этот параметр не относится к числу признаков какого-либо заболевания, его значение определяет вероятность сдавливания спинного мозга. Чем уже спинномозговой канал, тем выше вероятность более тяжелого клинического течения заболевания [7].

Таким образом, в число признаков дегенеративно-дистрофического поражения позвоночно-двигательного сегмента поясничного отдела позвоночника входят клинические проявления (дорсалгия, рефлекторные и компрессионные синдромы) и рентгенологические (нарушения структуры межпозвоночного диска, пространственного расположения тел позвонков, изменения замыкательных поверхностей тел позвонков и суставных отростков, ширина спинномозгового канала). Соотношения названных признаков определяют необходимость консервативного или оперативного лечения либо отсутствие такой необходимости.

Выбор дескрипторов поясничного остеохондроза, определяющих необходимость консервативных и оперативных методов лечения. Для описания состояния одного исследуемого позвоночно-двигательного сегмента введем множество дескрипторов DDP , представляющих перечисленные выше симптомы дегенеративно-дистрофического процесса. Для обозначения каждого из них применим бинарный дескриптор, отражающий наличие либо отсутствие того или иного проявления заболевания.

Для описания начальных проявлений дегенеративно-дистрофического процесса будем использовать двоичные показатели $I(PN)$ и $I(FR)$, определяющие состояние пульпозного ядра и фиброзного кольца соответственно. Так, значение $I(PN) = 1$ соответствует дегидратации пульпозного ядра; $I(FR) = 1$ отражает появление трещин фиброзного кольца. Значения $I(PN)$ и $I(FR)$ равны нулю при нормальном состоянии соответствующей части межпозвоночного диска.

Для описания признаков грыжеобразования с помощью показателей $I(HN1)$, $I(HN2)$, $I(HN3)$ и $I(HN4)$ обозначим:

$I(HN1) = 1$ – грыжа первой степени;

$I(HN2) = 1$ – грыжа второй степени;

$I(HN3) = 1$ – грыжа третьей степени;

$I(HN4) = 1$ – грыжа четвертой степени;

$I(HN1) = 0$, $I(HN2) = 0$, $I(HN3) = 0$, $I(HN4) = 0$ – отсутствует грыжа соответствующей степени.

Для описания морфофункциональных (рентгеновских) признаков дегенеративно-дистрофического процесса используем показатели $I(GP)$, $I(BS)$ и $I(SC)$:

$I(GP) = 1$ – сглаживание физиологического лордоза;

$I(BS) = 1$ – нестабильность позвоночно-двигательного сегмента;

$I(SC) = 1$ – поясничный сколиоз;

$I(GP) = 0$, $I(BS) = 0$, $I(SC) = 0$ – норма.

Болевым проявлениям в области позвоночника соответствуют показатели $I(PV)$ и $I(LUM)$:

$I(PV) = 1$ – присутствует умеренный болевой синдром;

$I(LUM) = 1$ – отмечена острая боль (люмбаго);

$I(PV) = 0$, $I(LUM) = 0$ – отсутствуют соответствующие синдромы.

Для описания сагиттального размера спинномозгового канала будем использовать показатель $I(VC)$:

$I(VC) = 1$ – узкий спинномозговой канал (≤ 12 мм) [7];

$I(VC) = 0$ – нормальный диаметр спинномозгового канала.

Для описания изменений костных структур позвонка будем использовать следующие показатели:

$I(OF) = 1$ – присутствие одного или нескольких остеофитов;

$I(PL) = 1$ – разрастание замыкательных пластинок (субхондральный склероз);

$I(AP) = 1$ – деформация и склероз суставных отростков;

$I(OF) = 0$, $I(PL) = 0$, $I(AP) = 0$ – отсутствие соответствующего нарушения.

Экстравертебральные признаки могут быть заданы с помощью показателей $I(CVS)$, $I(CCR)$, $I(REF)$, $I(RCP)$ и $I(RCI)$. Например:

$I(CVS) = 1$ – признаки компрессии сосудов;

$I(CCR) = 1$ – признаки компрессии спинного мозга и (или) дурального мешка (исключая радикулопатию и радикулоишемию);

$I(REF) = 1$ – рефлекторные нарушения;

$I(RCP) = 1$ – радикулопатия;

$I(RCI) = 1$ – радикулоишемия.

Нулевые значения перечисленных показателей также соответствуют отсутствию всех проявлений исследуемой группы нарушений.

Множество проявлений дегенеративно-дистрофических заболеваний DDP объединяет следующие элементы:

$$DDP = \{I(PN), I(FR), I(HN1), I(HN2), I(HN3), I(HN4), I(GP), I(BS), I(VC), I(PV), I(LUM), I(CVS), I(CCR), I(RCP), I(RCI), I(REF)\}. \quad (1)$$

Для принятия решения о способе необходимого лечения требуется информация о том, какие меры, направленные на восстановление нарушенных функций исследуемой системы органов, уже применялись. Для обозначения состава задействованных методов лечения будем использовать показатели

$$D(A) = \{D(A_{HN}), D(A_{GP}), D(A_{BS}), D(A_{PV}), D(A_{LUM}), D(A_{CVS}), D(A_{CCR}), D(A_{REF}), D(A_{OP})\}, \quad (2)$$

где $D(A_{HN})$ – применение медикаментозных, ортопедических, физиотерапевтических методов, замедляющих дегенеративно-дистрофический процесс межпозвоночного диска; $D(A_{GP}), D(A_{BS})$ – компенсация морфологических нарушений за счет ортопедических мероприятий (иммобилизации, вытяжения позвоночника, мануальной терапии); $D(A_{PV}), D(A_{LUM})$ – обезболивание различной степени интенсивности; $D(A_{CVS}), D(A_{CCR})$ и $D(A_{REF})$ – применение приемов компенсации компрессионных и рефлекторных синдромов; $D(A_{OP})$ – проведение операции. Значения данных показателей равны единице, если соответствующая группа лечебных мероприятий применялась или применяется в настоящее время.

Показатели внешних ограничений EN характеризуют внешние по отношению к моделируемой системе признаки (заболевания или иные физиологические состояния), которые определяют приоритет риска негативных последствий операции над ее ожидаемым положительным эффектом [10, 11].

Таким образом, каждая стадия дегенеративно-дистрофического заболевания отдельного позвоночно-двигательного сегмента поясничного отдела позвоночника может быть описана вектором вида

$$\mathbf{q} = \{I(PN), I(FR), I(HN1), I(HN2), I(HN3), I(HN4), I(GP), I(BS), I(SC), I(VC), I(PV), I(LUM), I(CVS), I(CCR), I(RCP), I(RCI), I(REF), D(A_{HN}), D(A_{GP}), D(A_{BS}), D(A_{PV}), D(A_{LUM}), D(A_{CVS}), D(A_{CCR}), D(A_{REF}), D(A_{OP}), EN\}. \quad (3)$$

Каждый из 27 элементов вектора \mathbf{q} может принимать одно из двух значений: 1 при наличии определенного нарушения или применении некоторого метода лечения и 0 в противном случае. Так, принципиально возможно описание 2^{27} состояний. Вместе с тем часть таких описаний содержит противоречивые сочетания исследуемых показателей.

Формализация взаимосвязей между основными дескрипторами дегенеративно-дистрофических заболеваний. С целью исключения противоречивых сочетаний был выполнен анализ взаимосвязей между показателями I , D и EN и сформированы основные ограничения. Грыжа межпозвоночного диска проходит последовательно четыре стадии, поэтому:

$$\text{если } I(HN1) = 1, \text{ то } I(HN2) = 0 \wedge I(HN3) = 0 \wedge I(HN4) = 0; \quad (4)$$

$$\text{если } I(HN2) = 1, \text{ то } I(HN1) = 0 \wedge I(HN3) = 0 \wedge I(HN4) = 0; \quad (5)$$

$$\text{если } I(HN3) = 1, \text{ то } I(HN1) = 0 \wedge I(HN2) = 0 \wedge I(HN4) = 0; \quad (6)$$

$$\text{если } I(HN4) = 1, \text{ то } I(HN1) = 0 \wedge I(HN2) = 0 \wedge I(HN3) = 0. \quad (7)$$

Изменения в геометрии позвоночника, обусловленные дегенеративно-дистрофическими заболеваниями (изменения углов и расстояний между базальной и покровной поверхностями соседних позвонков, а также углов, образуемых остистыми отростками) [1–3], возникают вследствие нарушения морфофункциональных характеристик межпозвоночного диска. Принципиально возможен также вариант изменения формы позвонковых сочленений вследствие травмы, но в этом случае изменения формы тел позвонков будут существенно отличаться от нарушений, вызванных дегенеративными изменениями, т. е. они не могут быть классифицированы как нарушения, отнесенные к признакам $I(GP) = 1$.

Следовательно, отсутствие грыжи первой и последующих стадий гарантирует отсутствие распрямления прогиба позвоночника $I(GP)$:

$$\text{если } I(HN1) = 0 \wedge I(HN2) = 0 \wedge I(HN3) = 0 \wedge I(HN4) = 0, \text{ то } I(GP) = 0. \quad (8)$$

Трещины фиброзного кольца $I(FR)$, характерные для дегенеративно-дистрофического процесса, возникают параллельно с изменениями упругих свойств пульпозного ядра, а значит:

$$\text{если } I(PN) = 0, \text{ то } I(FR) = 0. \quad (9)$$

В свою очередь, нарушение положения тел позвонков и нестабильность сегмента являются следствием разрыва волокон и образования трещин фиброзного кольца, поэтому:

$$\text{если } I(FR) = 0, \text{ то } I(GP) = 0 \wedge I(BS) = 0. \quad (10)$$

Появление остеофитов, разрастание замыкательных пластинок и суставных отростков, а также сколиоз поясничного отдела служат ответной реакцией на перераспределение нагрузки на позвоночник из-за изменения взаимного расположения тел позвонков. Эти признаки являются следствием дегенеративно-дистрофического процесса и не возникают у здоровых людей при нормальном строении позвоночника. Данные взаимосвязи можно описать следующим выражением:

$$\text{если } I(GP) = 0, \text{ то } I(OF) = 0 \wedge I(PL) = 0 \wedge I(AP) = 0 \wedge I(SC) = 0. \quad (11)$$

Компрессия (сдавливание) спинного мозга или нервов возникает при нарушении положения соседних позвонков и выпячивании межпозвоночного диска:

$$\text{если } I(GP) = 0 \wedge I(BS) = 0, \text{ то } I(CCP) = 0 \wedge I(RCI) = 0 \wedge I(RCP) = 0. \quad (12)$$

В отношении рефлекторных проявлений $I(REF)$ и признаков компрессии сосудов $I(CVS)$ нельзя описать аналогичные запреты иерархии в силу того, что клиническая картина этих проявлений очень схожа с другими нарушениями функционирования организма, не связанными с дегенеративно-дистрофическим процессом.

Приемы, направленные на замедление дегенеративно-дистрофического процесса и устранение его последствий, применяются в случае выявления тех или иных признаков нарушений:

$$D(A_{HN}) = 1, \text{ только если } I(HN1) = 1 \vee I(HN2) = 1 \vee I(HN3) = 1 \vee I(HN4) = 1; \quad (13)$$

$$D(A_{GP}) = 1, \text{ только если } I(GP) = 1; \quad (14)$$

$$D(A_{BS}) = 1, \text{ только если } I(BS) = 1; \quad (15)$$

$$D(A_{PV}) = 1, \text{ только если } I(PV) = 1; \quad (16)$$

$$D(A_{LUM}) = 1, \text{ только если } I(LUM) = 1; \quad (17)$$

$$D(A_{CVS}) = 1, \text{ только если } I(CVS) = 1; \quad (18)$$

$$D(A_{CCR}) = 1, \text{ только если } I(CCR) = 1; \quad (19)$$

$$D(A_{REF}) = 1, \text{ только если } I(REF) = 1. \quad (20)$$

Решение о необходимости оперативного вмешательства в соответствии с принятой практикой лечения дегенеративно-дистрофических заболеваний принимается в одном из следующих случаев [7–9]: грыжа второй степени при узком спинномозговом канале; грыжа третьей или четвертой степени, сопровождающаяся тяжелыми неврологическими нарушениями (радикулоишемией или радикулопатией) или люмбаго, проявления которого не снимает медикаментозное лечение, т. е.

$$\begin{aligned} & ((I(HN2) = 1 \wedge I(VC) = 1) \vee I(HN3) = 1 \vee I(HN4) = 1) \wedge \\ & \wedge (I(RCI) = 1 \vee I(RCP) = 1 \vee (I(LUM) = 1 \wedge D(A_{LUM}) = 1)). \end{aligned} \quad (21)$$

Операция предполагает удаление грыжи диска. После ее проведения следует рассматривать возможность:

1) восстановления состояния позвоночно-двигательного сегмента до нормы, и тогда

$$D(A_{op}) = 1 \wedge I(HN1) = 0 \wedge I(HN2) = 0 \wedge I(HN3) = 0 \wedge I(HN4) = 0 \wedge I(GP) = 0 \wedge I(BS) = 0; \quad (22)$$

2) рецидива, т. е. выпячивания (грыжи) оставшейся части ядра:

$$D(A_{op}) = 1 \wedge (I(HN1) = 1 \vee I(HN2) = 1 \vee I(HN3) = 1 \vee I(HN4) = 1) \wedge I(GP) = 1. \quad (23)$$

В литературе описаны случаи неудачного исхода операции, которые приводят к сохранению болевых, компрессионных и рефлекторных нарушений [10, 11]. Следовательно, один или несколько из этих признаков могут сохраняться, поэтому соответствующие запреты не включены в математическую модель дегенеративно-дистрофического заболевания.

Ограничения на применение некоторых методов лечения определяются наличием заболеваний (или других состояний), не связанных напрямую с исследуемым состоянием, поэтому нельзя формализовать какую-либо взаимосвязь показателя EN с признаками отсутствия проявлений дегенеративно-дистрофического заболевания I . Однако наличие таких ограничений делает невозможным применение тех или иных процедур и манипуляций. Для случая лечения дегенеративно-дистрофических заболеваний существует ряд противопоказаний к проведению оперативного вмешательства (заболевания органов сердечно-сосудистой системы, ранний детский возраст и пр. [11]):

$$\text{если } EN = 1, \text{ то } D(A_{op}) = 0. \quad (24)$$

С учетом рассмотренных взаимосвязей между дескрипторами дегенеративно-дистрофического поражения поясничного отдела состояние q позвоночно-двигательного сегмента может характеризоваться одним из 282 значений.

Сравнение полученных описаний состояния позвоночно-двигательного сегмента под влиянием дегенеративно-дистрофических изменений позволяет выделить классы состояний, принципиально отличающихся составом необходимых методов лечения, а значит, требующих различных подходов к организации автоматизированного диалога со специалистом, принимающим решение о лечении.

Класс b_1 объединяет состояния, не требующие лечения, для которых справедливо следующее условие:

$$I(HN1) = 0 \wedge I(HN2) = 0 \wedge I(HN3) = 0 \wedge I(HN4) = 0 \wedge D(A_{op}) = 0. \quad (25)$$

Диагностика состояний данного класса требует информации только об отсутствии грыжи той или иной степени, а также о том, что пациент не был прооперирован. Следовательно, класс b_1 может быть выявлен в процессе автоматического анализа цифровых изображений позвоночника с минимальным вмешательством специалиста медицинского профиля, выполняющего выбор изображений для анализа и ставящего отметку о том, была ли проведена операция. Вместе с тем выявление грыжи на медицинском изображении является достаточно сложной самостоятельной задачей, отдельные аспекты которой рассмотрены в [12].

Класс b_2 представляют состояния, при которых достаточно консервативного лечения: есть признаки дегенеративно-дистрофического процесса, но нет тех симптомов, которые служат основанием для оперативного вмешательства, а именно

$$(I(HN1) = 1) \vee (I(HN2) = 1) \vee (I(HN3) = 1) \vee (I(HN4) = 1) \wedge (I(LUM) = 0) \wedge (I(RCI) = 0) \wedge (I(RCP) = 0). \quad (26)$$

Перечисленные признаки могут быть получены на основе анализа цифровых изображений и автоматизированного опроса пациента. Лечение данных состояний носит симптоматический характер и требует анализа большого объема информации о состоянии пациента и уже задействованных методах лечения. Автоматизация этого процесса с достаточным уровнем точности является очень трудоемкой.

В класс b_3 включены состояния, при которых для преодоления дегенеративно-дистрофического процесса необходимо оперативное вмешательство и нет противопоказаний со стороны системы внешнего регулирования:

$$\begin{aligned} &(((I(HN2) = 1) \vee (I(VC) = 1)) \wedge ((I(HN3) = 1) \vee (I(HN4) = 1)) \wedge \\ &\wedge ((I(RCI) = 1) \vee (I(RCP) = 1) \vee ((I(LUM) = 1) \wedge (D(A_{LUM}) = 1)))) \wedge (EN = 0). \end{aligned} \quad (27)$$

Для диагностики состояний этого класса помимо анализа информации, содержащейся на медицинских изображениях, требуется организация направленного автоматизированного диалога со специалистом-медиком.

Класс b_4 объединяет состояния после операции, которая позволила восстановить функции позвоночно-двигательного сегмента:

$$\begin{aligned} I(PV) = 0 \wedge I(LUM) = 0 \wedge I(CVS) = 0 \wedge I(CCP) = 0 \wedge I(RCI) = 0 \wedge \\ \wedge I(RCP) = 0 \wedge I(REF) = 0 \wedge D(A_{Op}) = 1. \end{aligned} \quad (28)$$

Для данного класса состояний также необходим автоматизированный опрос группы специалистов, но по иной (в сравнении с b_3) схеме.

Отнесение состояния к классу b_5 означает, что была проведена операция, однако сохранился ряд проявлений дегенеративно-дистрофического заболевания:

$$\begin{aligned} I(PV) = 1 \vee I(LUM) = 1 \vee I(CVS) = 1 \vee I(CCP) = 1 \vee I(RCI) = 1 \vee \\ \vee I(RCP) = 1 \vee I(REF) = 1 \wedge D(A_{Op}) = 1. \end{aligned} \quad (29)$$

Состав симптомов, исследуемых при диагностике таких состояний, схож с используемым при исследовании состояний класса b_4 , поэтому возможна разработка общей схемы ведения направленного диалога.

К классу b_6 отнесены состояния, когда операция необходима, но не может быть проведена, так как внешние по отношению к исследуемой области системы определяют повышенный риск негативного исхода операции. Для таких состояний отмечены все признаки, характерные для b_3 , и при этом $EN = 1$. Поэтому необходимые сведения могут быть получены на основе применения схемы автоматизированного диалога для класса b_3 .

Итак, выделены шесть классов ($b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$), объединяющих состояния одного позвоночно-двигательного сегмента по принципу различия целей и возможностей лечения. Решение задачи определения принадлежности исследуемого позвоночно-двигательного сегмента к одному из шести выделенных на предыдущем этапе классов требует построения правила классификации. Как видно из описания, для каждого класса существует несколько параметров, значение которых определяет принадлежность объекта к данному классу. При этом некоторые параметры и их группы присутствуют в правилах разграничения двух и более классов. Следовательно, для классификации необходимо использовать дескрипторы:

- нормального состояния межпозвоночного диска

$$DS1 = (I(HN1) = 0 \wedge I(HN2) = 0 \wedge I(HN3) = 0 \wedge I(HN4) = 0); \quad (30)$$

- наличия показаний для операции

$$DS2 = ((I(HN2) = 1 \vee I(VC) = 1) \wedge I(HN3) = 1 \vee I(HN4) = 1) \wedge \\ \wedge ((I(RCI) = 1 \vee (I(RCP) = 1 \vee ((I(LUM) = 1 \wedge D(A_{LUM}) = 1))))); \quad (31)$$

– реализации оперативного вмешательства

$$DS3 = (D(A_{OP}) = 1); \quad (32)$$

– присутствия болевых, компрессионных и рефлексорных синдромов

$$DS4 = (I(PV) = 1 \vee I(LUM) = 1 \vee I(CVS) = 1 \vee I(CCP) = 1 \vee I(RCI) = 1 \vee I(RCP) = 1 \vee I(REF) = 1); \quad (33)$$

– внешнего регулирования

$$DS5 = (EN = 1). \quad (34)$$

Для объектов распознаваемых классов $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ данные дескрипторы принимают значения, представленные в следующей матрице, где номер столбца соответствует номеру класса:

$$\left\{ \begin{array}{l} DS1 \\ DS2 \\ DS3 \\ DS4 \\ DS5 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \vee 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 \vee 1 & 0 \vee 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\}. \quad (35)$$

Итак, исследуемые состояния позвоночно-двигательного сегмента можно классифицировать следующим образом:

b_1 , если $DS1 = 1 \wedge DS3 = 0$;

b_2 , если $DS1 = 0 \wedge DS2 = 0$;

b_3 , если $DS1 = 0 \wedge DS2 = 1 \wedge DS5 = 0$;

b_4 , если $DS1 = 1 \wedge DS3 = 1 \wedge DS4 = 0$;

b_5 , если $DS1 = 1 \wedge DS4 = 1$;

b_6 , если $DS2 = 1 \wedge DS5 = 1$.

Для разграничения выделенных классов используем матрицу

$$\left\{ \begin{array}{l} DS1 \\ DS2 \\ DS3 \\ DS4 \\ DS5 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & - \\ - & 0 & 1 & - & - & 1 \\ 0 & - & - & 1 & - & - \\ - & - & - & 0 & 1 & - \\ - & - & 0 & - & - & 1 \end{array} \right\}, \quad (36)$$

где «—» означает, что значение соответствующего дескриптора не учитывается при классификации.

Заключение. Полученные правила позволяют выделить состояния позвоночника, требующие принципиально различных подходов к лечению. Результатом данного этапа исследований является предварительная классификация, необходимая для обоснования выбора основного направления лечения (консервативного или оперативного) и определения степени тяжести заболевания. Кроме того, разделение представленных классов дает возможность выбрать схему автоматизированного диалога с пациентами и врачами различных профилей, направленную на конкретизацию решения и определение наиболее эффективных в данном состоянии лечебных мероприятий. Этот этап классификации определяет ряд вопросов, которые следует рассмотреть на следующих этапах принятия решения, а также источники информации (цифровые изображе-

ния позвоночника, сведения о проведенных лечебных мероприятиях, различные результаты опроса пациента и врача), которые следует задействовать при исследовании.

Список использованных источников

1. Ширшов, А. В. Поясничный остеохондроз: диагностика, клиника и лечение / А. В. Ширшов, М. А. Пирадов // РМЖ. – 2004. – № 4. – С. 212–219.
2. Тюрников, В. М. Дегенеративно-дистрофические поражения позвоночника: диагностика, клиника и лечение / В. М. Тюрников // РМЖ. – 2008. – № 26. – С. 17–39.
3. Автоматизированная диагностика и планирование лечения зубочелюстных аномалий / Л. Н. Ламбин [и др.]. – Минск : Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси, 1996. – 93 с.
4. Закревский, А. Д. Логика распознавания / А. Д. Закревский. – Минск : Наука и техника, 1988. – 118 с.
5. Kovalev, V. A. Detection of structural differences between the brains of schizophrenic patients and controls. *Psychiatry Research* / V. A. Kovalev, M. Petrou, J. Suckling // *Neuroimaging*. – 2003. – Vol. 124. – P. 177–189.
6. Масалитина, Н. Н. Применение автоматизированного классификатора результатов компьютерной томографии для построения геометрической модели позвонка человека / Н. Н. Масалитина, К. С. Курочка // Доклады БГУИР. – 2017. – № 3. – С. 12–19.
7. Остеохондроз позвоночника / Р. Г. Биктимиров [и др.] // Альманах клинической медицины. – 2004. – № 7. – С. 328–337.
8. Кротенков, П. В. МРТ в диагностике и лечении грыж грудных межпозвоночных дисков / П. В. Кротенков, А. М. Киселев, Л. А. Шерман // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2007. – № 4. – С. 53–57.
9. Барыкина, Н. В. Справочник по хирургии / Н. В. Барыкина. – М. : Феникс, 2012. – 512 с.
10. Мухамеджанов, Х. Изучение клинических осложнений чрескожной вертебропластики при патологии позвоночника / Х. Мухамеджанов // Казахский медицинский журнал. – 2014. – № 2. – С. 32–35.
11. Зарецков, В. В. Результаты вертебропластики при повреждениях грудного и поясничного отделов позвоночника у больных с остеопорозом / В. В. Зарецков // Саратовский науч.-мед. журнал. – 2009. – № 2. – С. 245–247.
12. Рентгенометрическая оценка кинематики пояснично-крестцового отдела позвоночника при остеохондрозе с помощью программного средства «Волот» / Е. Л. Цитко [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. – 2017. – № 4. – С. 35–40.

References

1. Shirshov A. V., Piradov M. A. Poyasnichnyiy osteohondroz: diagnostika, klinika i lechenie [Lumbar osteochondrosis: diagnosis, clinic and treatment]. *Russkij medicinskij zhurnal [Russian Medical Journal]*, 2004, no. 4, pp. 212–219 (in Russian).
2. Tyurnikov V. M. Degenerativno-distroficheskie porazheniya pozvonochnika: diagnostika, klinika i lechenie [Degenerative-dystrophic lesions of the spine: diagnosis, clinic and treatment]. *Russkij medicinskij zhurnal [Russian Medical Journal]*, 2008, no. 26, pp. 17–39 (in Russian).
3. Lambin L. N., Levin G. M., Tokarevich I. V., Melnichenko E. M., Chudakov O. P., Glinnik A. V. Avtomatizirovannaya diagnostika i planirovanie lecheniya zubochelyustnyih anomalij. *Automated Diagnosis and Treatment Planning for Dental and Maxillary Anomalies*. Minsk, Institut tehniczeskoj kibernetiki akademii nauk Belarusi, 1996, 93 p. (in Russian).
4. Zakrevskiy A. D. Logika raspoznavaniya. *Recognition Logic*. Minsk, Nauka i tehnika, 1988, 118 p. (in Russian).
5. Kovalev V. A., Petrou M., Suckling J. Detection of structural differences between the brains of schizophrenic patients and controls. *Psychiatry Research. Neuroimaging*, 2003, vol. 124, pp. 177–189.
6. Masalitina N. N., Kurochka K. S. Primenenie avtomatizirovannogo klassifikatora rezultatov kompyuternoy tomografii dlya postroeniya geometricheskoj modeli pozvonka cheloveka [Application of an automated classifier of computed tomography results for building a geometric model of a human vertebra]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radiojelektroniki [Reports Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2017, no. 3, pp. 12–19 (in Russian).
7. Biktimirov R. G., Kedrov A. V., Kiselev A. M., Kachkov I. A. Osteohondroz pozvonochnika [Spinal osteochondrosis]. *Al'manah klinicheskoy mediciny [Almanac of Clinical Medicine]*, 2004, no. 7, pp. 328–337 (in Russian).

8. Krotenkov P. V., Kiselev A. M., Sherman L. A. MRT v diagnostike i lechenii gryzh grudnykh mezhpozvonochnykh diskov [MRI in the diagnosis and treatment of hernias of the thoracic intervertebral discs]. Vestnik rentgenologii i radiologii [*Herald of Radiology and Radiology*], 2007, no. 4, pp. 53–57 (in Russian).

9. Baryikina N. V. Spravochnik po hirurgii. *Surgery Handbook*. Moscow, Feniks, 2012, 512 p. (in Russian).

10. Muhamedzhanov H. Izuchenie klinicheskikh oslozhneniy chreskozhnoy vertebroplastiki pri patologii pozvonochnika [Studying the clinical complications of percutaneous vertebroplasty in spinal pathology]. Kazahskiy meditsinskiy zhurnal [*Kazakh Medical Journal*], 2014, no. 2, pp. 32–35 (in Russian).

11. Zaretskov V. V. Rezultaty vertebroplastiki pri povrezhdeniyah grudnogo i poyasnichnogo otdelov pozvonochnika u bolnykh s osteoporozom [Results of vertebroplasty in injuries of the thoracic and lumbar spine in patients with osteoporosis]. Saratovskiy nauchno-meditsinskij zhurnal [*Saratov Scientific Medical Journal*], 2009, no. 2, pp. 245–247 (in Russian).

12. Tsitko E. L., Kurochka K. S., Masalitina N. N., Tsalko I. N., Komrakov V. V., Tsitko E. V. Rentgenometricheskaya otsenka kinematiki poyasnichno-kresttsovogo otdela pozvonochnika pri osteohondroze s pomoschyu programmogo sredstva "Volot" [Radiometric assessment of the kinematics of the lumbosacral spine in osteochondrosis using the Volot software]. Problemyi zdorovya i ekologii [*Health and Ecology Problems*], 2017, no. 4, pp. 35–40 (in Russian).

Информация об авторах

Масалитина Наталья Николаевна, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии», Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь.
E-mail: masalitina@rambler.ru

Курочка Константин Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь.
E-mail: kurochka@gstu.by

Цитко Евгений Леонидович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры хирургических болезней № 1 с курсом сердечно-сосудистой хирургии, Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь.
E-mail: fedor30@tut.by

Information about the authors

Natalia N. Masalitina, Senior Lecturer of Information Technologies Department of Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus.
E-mail: masalitina@rambler.ru

Konstantin S. Kurochka, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of Information Technologies Department of Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus.
E-mail: kurochka@gstu.by

Evgeniy L. Tsitko, Cand. Sci. (Med.), Assoc. Prof. of the Department of Surgical Diseases no. 1 with a course of cardiovascular surgery of Gomel State Medical University, Gomel, Belarus.
E-mail: fedor30@tut.by