

DOI: 10.7868/S0869813918090058

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОЛЖНЫХ  
ВЕЛИЧИН СИЛЫ ДЫХАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ НА ОСНОВЕ  
МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

© Б. И. Гельцер,<sup>1</sup> К. И. Шахгельдян,<sup>1,2</sup> И. Г. Курпатов,<sup>1</sup>  
В. Н. Котельников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Московский институт  
электронной техники», Москва, Россия  
E-mail: Boris.Geltser@vvsu.ru

В работе представлены результаты сравнительного анализа моделей расчета должных величин силы дыхательных мышц, разработанных на основе методов многофакторной линейной регрессии и искусственных нейронных сетей. Было обследовано 356 здоровых лиц (162 мужчины и 194 женщины) в возрасте от 18 до 89 лет, у которых оценивали уровень максимального экспираторного, инспираторного давлений в ротовой полости и SNIP-тест на аппарате MicroRPM (Великобритания). Точность 18 ранее разработанных линейных регрессионных моделей и моделей, построенных авторами, определяли с помощью средней относительной ошибки аппроксимации (СОАА) на обучающей и тестовой выборках. Показано, что использование нейронных сетей значительно повышает точность расчетов должных величин. Это особенно заметно в мужской популяции, где уровень СОАА был в диапазоне от 10.3 до 14.2 %, что указывало на высокое качество моделей. Уровень СОАА у женщин лишь немногим уступал аналогичным данным у мужчин и варьировал от 15.7 до 16.6 %. Анализ соотношений фактически измеренных и должных величин силы дыхательных мышц в реальном времени позволит оценить выраженность респираторной мышечной дисфункции и осуществлять своевременную коррекцию нарушенных функций.

*Ключевые слова:* должные величины силы дыхательных мышц, линейная регрессия, нейронные сети.

Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. Т. 104. № 9. С. 1065—1074. 2018

*B. I. Geltser,<sup>1</sup> K. I. Shakhgeldyan,<sup>1,2</sup> I. G. Kurpatov,<sup>1</sup> V. N. Kotelnikov.<sup>1</sup> RESULTS OF SIMULATION OF EXTRA VALUES OF FORCE OF RESPIRATORY MUSCLES BASED ON METHOD OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. <sup>1</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; <sup>2</sup> National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology», Moscow, Zelenograd, Russia; e-mail: Boris.Geltser@vvsu.ru.*

The paper presents the results of a comparative analysis of the models for calculating the proper values of the strength of the respiratory muscles (RM), developed on the basis of the methods of multifactorial linear regression and artificial neural networks. A total of 356 healthy individuals (162 men and 194 women) aged 18 to 89 years were examined and the maximum

expiratory, inspiratory pressure in the oral cavity and the SNIP test on the MicroRPM device (UK) were evaluated. The accuracy of 18 previously developed models and models constructed by the authors was determined using the mean relative approximation error (MRAE) on the training and test samples. It is shown that the use of neural networks significantly increases the accuracy of calculations of the proper values. This was particularly noticeable in the male population, where the MRAE level was in the range of 10.3 to 14.2 %, which indicated a high quality of the models. The level of MRAE in women was only slightly inferior to that in men and varied from 15.7 to 16.6 %. The analysis of the ratios of actually measured and proper RM strengths in real time will allow to assess the severity of respiratory muscle dysfunction and to perform timely correction of impaired functions.

*Key words:* proper values of the strength of the respiratory muscles, linear regression, neural networks.

RUSSIAN JOURNAL OF PHYSIOLOGY. V. 104. N 9. P. 1065—1074. 2018

Дыхательные мышцы являются одним из важнейших структурных элементов респираторной системы, обеспечивающих легочную вентиляцию, и общим фактором для всех механизмов, участвующих в регуляции дыхания. Дыхательные мышцы относятся к поперечно-полосатой скелетной мускулатуре и составляют 10—15 % от общей мышечной массы. Их основной задачей является создание отрицательного давления в грудной полости на вдохе и положительного на выдохе, которую выполняют соответственно, инспираторные и экспираторные мышцы.

Сила дыхательных мышц является важнейшим индикатором их функционального состояния и в значительной степени определяет адекватность легочной вентиляции текущим запросам организма. Для ее оценки большое распространение получил метод измерения максимальных статических давлений на уровнях полости рта и носа, которые обследуемый создает при «закрытых» дыхательных путях во время максимального вдоха и выдоха: максимального инспираторного (maximal inspiratory pressure — MIP), экспираторного (maximal expiratory pressure — MEP) и интраназального (sniff nasal inspiratory pressure — SNIP) давлений [5]. Измерение силы дыхательных мышц является основным инструментом для диагностики их дисфункции, которая сопутствует большинству хронических заболеваний органов дыхания, сердечно-сосудистой системы, нейромышечных, цереброваскулярных расстройств и других форм патологий [12]. Необходимость своевременного распознавания дисфункции дыхательных мышц связана с особой ролью респираторного мышечного компонента в развитии острых и хронических форм дыхательной недостаточности [1].

Ранняя диагностика дисфункции дыхательных мышц должна базироваться на точных представлениях о нормативных значениях их силовых характеристик. В ряде работ отмечена довольно широкая вариабельность значений MIP, MEP, SNIP в зависимости от возраста, пола и антропометрических данных обследуемых [8, 10]. Эти различия особенно заметны в молодом и среднем возрасте, а в старших возрастных группах они нивелируются [2]. Кроме того, в старческом возрасте сила дыхательных мышц существенно снижается в результате инволютивных процессов в органах дыхания, костном каркасе грудной клетки и скелетной мускулатуре [3]. Отмечена взаимосвязь силовых характеристик дыхательных мышц с некоторыми модифицируемыми факторами, например курением табака, которая усиливается в старших возрастных группах [12]. Вариабельность показателей силы дыхательных мышц зависит также от техники выполнения дыхательных маневров при ее измерении, конструктивных особенностей используемых приборов, мотивации пациентов. Неестественный характер инспираторного и экспираторного усилия при «закрытых»

дыхательных путях для многих пациентов является неприятным, а иногда и болезненным [1]. В ряде исследований показано, что при использовании не менее 10 попыток измерения силы дыхательных мышц регистрировались более высокие значения показателей MIP и MEP по сравнению с результатами, полученными после 2 или 3 попыток [5]. В некоторых работах установлена более высокая стабильность и воспроизводимость параметра SNIP по отношению к MIP и MEP [1]. Ряд авторов указывает на наличие взаимосвязей между силовыми характеристиками дыхательных мышц, скоростными показателями вентиляционной функции, легочными объемами, давлением пассивной эластической отдачи легких, комплайнса грудной клетки, которые в определенной мере зависят от типа соматической конституции [2]. Таким образом, объективная оценка силы дыхательных мышц при измерении максимальных давлений в полости рта и носа ассоциируется с влиянием многих модифицируемых и немодифицируемых факторов, которые необходимо учитывать в процессе проведения исследований и анализа изучаемых параметров. Кроме того, для диагностики дисфункции дыхательных мышц особое значение имеют данные по персонализированной норме или должным величинам, определяющим диапазон референсных значений измеряемых параметров. Использование должных величин, с одной стороны, подчеркивает индивидуальные различия здоровых людей, а с другой — позволяет стандартизировать исследования физиологических функций и выяснить выраженность их нарушений у конкретных пациентов. В то же время при оценке силы дыхательных мышц обычно не описывают степень ее отклонения от должных величин, как это принято, например, при характеристике функции внешнего дыхания, и не верифицируют выраженность респираторной мышечной дисфункции, что затрудняет клиническую интерпретацию полученных данных. Это связано с отсутствием до настоящего времени общепринятых нормативов, необходимых для сравнительного анализа результатов измерений. Именно поэтому рядом исследователей были разработаны одно- и многофакторные линейные и нелинейные регрессионные модели для расчета нормативных значений силовых характеристик дыхательных мышц, учитывающие возрастные, гендерные, а в некоторых случаях и антропометрические особенности обследуемых [4]. Кроме того, предполагалось, что их использование может нивелировать возможные погрешности в результатах измерений силы дыхательных мышц и снизить влияние факторов, обусловленных техническими причинами, недостаточной мотивацией и кооперацией обследуемых и др. Вместе с тем было показано, что общим недостатком этих моделей является высокий уровень ошибок в расчетах [11, 18].

В последние годы в биомедицинских исследованиях для моделирования физиологических функций помимо методов линейной и логистической регрессии все активней используются модели на основе нейронных сетей, в том числе и для моделирования респираторных функций [13, 14]. Было показано, что использование этих технологий существенно повышает точность проводимых расчетов [6].

Цель исследования состояла в разработке и сравнительной оценке моделей должных величин для показателей MIP, MEP, SNIP на основе методов машинного обучения и нейронных сетей.

## МЕТОДИКА

Проведено обследование 356 здоровых лиц разных возрастных групп. В группе молодого возраста (18—44 года; средний возраст —  $28 \pm 8.4$ ) было 176 человек, среднего (45—59 лет;  $51.2 \pm 3.7$ ) — 64, пожилого (60—74 года;

64.9 ± 4.4) — 42, старческого (75—89 лет; 81.1 ± 4.2) — 73. Мужчин было 162, женщин — 194.

В исследование не включали курильщиков, а также лиц с хроническими заболеваниями органов дыхания, декомпенсированной патологией системы кровообращения, центральной и периферической нервной системы, эндокринными заболеваниями, ожирением I и II степени, анемией, хронической почечной и печеночной недостаточностью, злокачественными новообразованиями любой локализации. Обследование проводилось после подписания участником информированного согласия.

Регистрировали антропометрические показатели: рост, массу тела, окружности грудной клетки, плеча, предплечья, бедра и голени. Среднюю толщину кожно-жировых складок измеряли в 9 стандартных точках с помощью электронного цифрового калипера КЭЦ-100 (АО «Тулиновский приборостроительный завод», Россия). Используя эти показатели, по общеизвестным формулам рассчитывали индекс массы тела (ИМТ) и массу скелетных мышц (МСМ). Оценку МЕР, МIP и SNIP-теста проводили на аппарате MicroRPM (CareFusion, Великобритания). Регистрация данных показателей у обследуемых проводилась в положении сидя после 5-кратного выполнения дыхательных маневров. При этом фиксировалась попытка с максимальным результатом.

Обработка данных выполнялась на языке R в пакете RStudio v.1.0.153. Для анализа зависимостей показателей МЕР, МIP, SNIP от антропометрических характеристик, гендерной принадлежности и возраста обследуемых использовали диаграммы размахов, корреляционный анализ Пирсона и *t*-критерии Стьюдента [3]. Расчет должных величин МЕР, МIP и SNIP выполняли, используя линейные регрессионные модели и нейронные сети. Последние «обучали» с помощью пакета «neuralnet» из R-Studio методом упругого обратного распространения с контролем весов [15]. Оценку точности моделей выполняли с помощью средней относительной ошибки аппроксимации (СОАА) на обучающей и тестовой выборках [9]. Последние формировали отдельно для мужчин и женщин в стандартном соотношении:  $\frac{3}{4}$  обследованных — для обучающей выборки (ОВ) и  $\frac{1}{4}$  — для тестовой (ТВ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования на общей выборке обследованных была проверена точность ранее разработанных моделей должных величин МЕР, МIP и SNIP с использованием СОАА. Последняя показывает, на сколько процентов модельные значения отличаются от фактически измеренных. При этом СОАА ≤ 15 % демонстрирует высокую точность моделей [4]. Для анализа были отобраны 18 моделей из наиболее цитируемых научных работ по данной проблеме [7, 8, 10, 16, 17]. В большинстве из них в качестве предикторов учитывался пол, возраст, рост, а в некоторых — вес и ИМТ обследованных (табл. 1).

Результаты исследования показали, что диапазон размаха СОАА в разных моделях составлял от 25.5 до 77.2 % (в среднем — 39.2 %). Даже лучшие из них имели значение СОАА более 20 % и составляли для показателя МЕР у мужчин и женщин соответственно 27.1 % и 26.6 %, МIP — 25.5 и 26.8 %, SNIP — 29.9 и 51 %. Таким образом, анализ точности ранее разработанных моделей силы дыхательных мышц указывает на существенные отклонения расчетных должных величин от фактически измеренных.

На втором этапе исследования осуществлялось моделирование должных величин силы дыхательных мышц у обследованного контингента. Для оценки

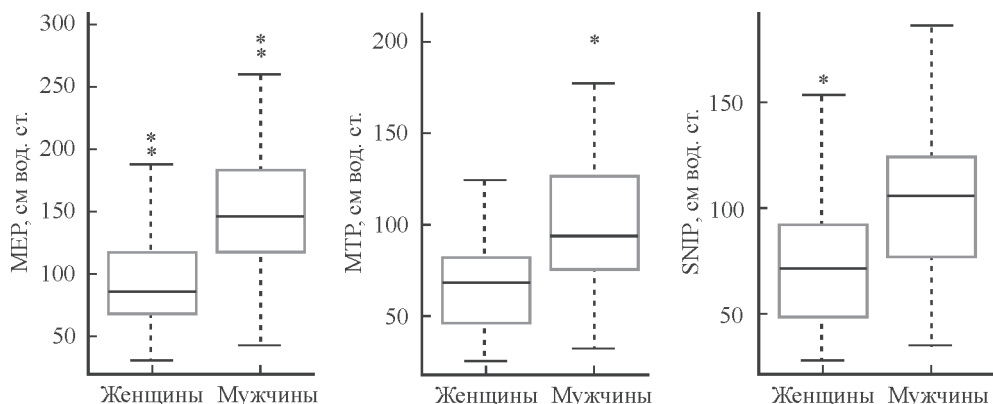
Таблица 1

Оценка точности моделей должных величин силы дыхательных мышц

Показатель силы дыхательных мышц	Линейная регрессионная модель	Ссылка	Количество обследованных	COOA, %
MEP мужчин	$268 - 1.03 \cdot \text{возраст}$	[7]	60	70.5
MEP женщин	$170 - 0.53 \cdot \text{возраст}$	[7]	60	77.2
MIP мужчин	$143 - 0.55 \cdot \text{возраст}$	[7]	60	40.8
MIP женщин	$104 - 0.51 \cdot \text{возраст}$	[7]	60	38.1
MEP мужчин	$180 - 0.91 \cdot \text{возраст}$	[17]	48	27.3
MEP женщин	$3.5 + 0.55 \cdot \text{рост}$	[17]	87	37.7
MIP мужчин	$142 - 1.03 \cdot \text{возраст}$	[17]	48	25.5
MIP женщин	$-43 + 0.71 \cdot \text{рост}$	[17]	87	41.7
MEP мужчин	$174 - 0.83 \cdot \text{возраст}$	[8]*	—	27.1
MEP женщин	$131 - 0.86 \cdot \text{возраст}$	[8]*	—	26.6
MIP мужчин	$120 - 0.4 \cdot \text{возраст}$	[8]*	—	30.7
MIP женщин	$108 - 0.61 \cdot \text{возраст}$	[8]*	—	35.3
MEP мужчин	$566.98 - 2.85 \cdot \text{рост} + 3.29 \cdot \text{вес} - 3.8 \cdot \text{ИМТ} - 0.27 \cdot \text{возраст}$	[10]	125	32.4
MEP женщин	$178.49 - 0.88 \cdot \text{рост} + 2.19 \cdot \text{вес} - 3.65 \cdot \text{ИМТ} - 0.42 \cdot \text{возраст}$	[10]	125	30.4
MIP мужчин	$278.53 - 1.23 \cdot \text{рост} + 1.6 \cdot \text{вес} - 3.8 \cdot \text{ИМТ} - 0.27 \cdot \text{возраст}$	[10]	125	26.4
MIP женщин	$74.85 - 0.32 \cdot \text{возраст}$	[10]	125	26.8
SNIP мужчин	$-0.42 \cdot \text{возраст} + 126.8$	[16]	80	29.9
SNIP женщин	$-0.22 \cdot \text{возраст} + 94.9$	[16]	80	51

Примечание. Рост (см), вес (кг). \* Усредненные модели по результатам исследований других авторов.

степени информативности потенциальных предикторов, участвующих в построении моделей, проводилось их предварительное тестирование. При этом были установлены определенные различия силовых характеристик дыхательных мышц, ассоциированные с полом и возрастом обследованных. Так, диаграммы размахов измеренных параметров (см. рисунок) и *t*-тест Стьюдента ( $p < 0.001$ ) убедительно демонстрировали более высокий их уровень у мужчин по сравнению с женщинами. В ранее проведенном исследовании нами была установлена нелинейная возрастная динамика изменений силы дыхательных мышц, проявляющаяся ростом их показателей от молодого возраста к среднему и последующим снижением от пожилого к старческому [2]. Корреляционный анализ подтвердил наличие достоверных отрицательных взаимосвязей между индикаторами силы дыхательных мышц и возрастом обследованных (табл. 2). Таким образом, результаты анализа позволили выделить гендерный и возрастной признаки в качестве облигатных параметров проектируемых моделей. Оценка информативности других потенциальных факторов моделирования проводилась по результатам корреляционного анализа MEP, MIP и SNIP с показателями роста, веса, ИМТ, окружности грудной клетки, верхних и нижних конечностей. У мужчин была установлена достоверная положительная взаимосвязь силовых параметров дыхательных мышц с MCM, окружностью



Диаграммы размахов показателей MEP, MIP и SNIP в зависимости от гендерной принадлежности обследованных.

плеча, предплечья, бедра и голени, которые косвенно характеризуют объем мышечной массы. Для женщин было характерным наличие отрицательных корреляций силы дыхательных мышц с окружностью грудной клетки и отсутствие взаимосвязей с индикаторами мышечной массы. Кроме того, у мужчин и женщин не было зафиксировано корреляций MEP, MIP и SNIP с ростом, весом и ИМТ.

Необходимо отметить, что отбор дополнительных факторов для моделирования должных величин силы дыхательных мышц был связан с решением проблемы их мультиколлинеарности, обусловленной наличием тесных корреляционных связей между потенциальными предикторами. Известно, что использование комбинаций коррелируемых факторов в одной модели существенно

Таблица 2

Коэффициенты корреляции MEP, MIP, SNIP с возрастом и антропометрическими показателями

Показатель	MEP		MIP		SNIP	
	М	Ж	М	Ж	М	Ж
Возраст	-0.38**	-0.5**	-0.51**	-0.62**	-0.58**	-0.53**
ОП	0.41**	0.02	0.32**	-0.09	0.35**	0.08
Рост	0.15	0.18	0.06	0.17	0.18	0.14
ОГ	0.06	-0.35**	-0.01	-0.42**	0.02	-0.32**
ИМТ	0.16	-0.15	0.07	-0.19	0.16	-0.04
Вес	0.23	-0.07	0.1	-0.1	0.22	0.01
МСМ	0.4**	0.13	0.39**	0.06	0.44**	0.17
ОГО	0.28*	0.17	0.32**	0.06	0.33**	0.11
ОПП	0.31**	-0.03	0.25*	-0.11	0.22	0.05
ОБ	0.36**	0.19	0.44**	0.2*	0.49**	0.25

Примечание (здесь и в табл. 3, 4). ОП — окружность плеча, ОГ — окружность грудной клетки, ОГО — окружность голени, ОПП — окружность предплечья, ОБ — окружность бедра, М — мужчины, Ж — женщины. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ .

Таблица 3

Модели линейной регрессии для расчета должных величин показателей МЕР, МІР и SNIP

Показатель силы дыхательных мышц	Модель линейной регрессии	СООА на ОБ, %	СООА на ТВ, %
МЕР мужчин	$-0.011 \cdot \text{возраст}^2 + 5 \cdot \text{ОПП} + 30.16$	26.5	16.7
МЕР женщин	$-0.86 \cdot \text{возраст} + 1.87 \cdot \text{ОБ} + 40$	26	26.4
МІР мужчин	$-0.91 \cdot \text{возраст} + 3.4 \cdot \text{ОПП} + 38.06$	24.4	16.4
МІР женщин	$-0.69 \cdot \text{возраст} + 1.2 \cdot \text{ОБ} + 37$	22.1	25.6
SNIP мужчин	$-0.99 \cdot \text{возраст} + 4.11 \cdot \text{ОПП} + 28.2$	21.8	15.6
SNIP женщин	$-0.85 \cdot \text{возраст} + 1.97 \cdot \text{ОПП} + 67.35$	27.1	32.8

ухудшает ее качество [3]. Анализ показал наличие взаимосвязей между большинством антропометрических показателей. Так, у мужчин окружность плеча коррелировала с окружностью грудной клетки ( $r = 0.42, p < 0.001$ ), весом ( $r = 0.43, p < 0.001$ ) и ИМТ ( $r = 0.45, p < 0.001$ ). Кроме того, установлена корреляция данного показателя с МСМ ( $r = 0.71, p < 0.001$ ), окружностью бедра, предплечья и голени ( $r = 0.6, r = 0.62, r = 0.5$  соответственно,  $p < 0.001$ ). Некоторые из антропометрических показателей были также взаимосвязаны с возрастом. Например, окружность плеча и МСМ у мужчин имели отрицательную корреляцию с данным фактором ( $r = -0.36, p < 0.05$ ), а у женщин этот показатель прямо коррелировал с окружностью грудной клетки ( $r = 0.62, p < 0.01$ ). Таким образом, в модели расчета должных величин силы дыхательных мышц для отдельных гендерных групп помимо возраста можно было включать только один антропометрический показатель, не коррелирующий с другими предикторами модели. В этих случаях модель приобретала наилучшие характеристики качества: максимальные коэффициенты детерминации и наименьшие значения СООА. Такой подход к построению моделей позволил повысить их точность и обеспечить высокую ( $p < 0.001$ ) статистическую значимость.

Качество регрессионных моделей оценивали на обучающей и тестовой выборках (табл. 3). Результаты исследования показали, что диапазон размаха СООА в разных моделях силы дыхательных мышц составил от 16.7 до 32.8 % (в среднем — 22.3 %), что на 15.3 % ниже, чем средняя ошибка ранее разработанных моделей. Наиболее точными были модели должных величин SNIP, МІР и МЕР у мужчин (в среднем — 16.2 %). У женщин точность моделей была на 12 % ниже. Таким образом, разработанные нами модели не достигали рекомендуемых критериев качества [4].

На третьем этапе исследования для моделирования должных величин были обучены многослойные нейронные сети (табл. 4). Архитектура всех разработанных искусственных нейронных сетей была многоуровневой с числом нейронов на каждом уровне от 2 до 16. Веса в разных моделях на первом шаге обучения сети выбирались на основе случайного числа. Для поиска оптимальной сети случайное число увеличивалось в цикле до 100 000 раз, при этом наилучшей признавалась сеть с минимальной СООА на тестовой выборке.

Для оценки качества моделей должных величин силы дыхательных мышц, разработанных разными методами, был проведен сравнительный анализ значений СООА, полученных на тестовой выборке (табл. 5). Среди ранее разра-

Таблица 4

Нейронные сети для моделирования должных величин МЕР, МIP и SNIP

Показатель силы дыхательных мышц	Используемые характеристики (входы)	Архитектура сети	СООА на ОВ, %	СООА на ТВ, %
МЕР мужчин	Возраст, МСМ, вес, рост, ОПП, ОГ, ОП, ОГО, ОБ	4 слоя: 13, 8, 6 и 6 нейронов, СЧ — 26015	5.4	14.2
МЕР женщин	Возраст, ОГ, рост, ОПП	4 слоя: 13, 8, 6 и 6 нейронов, СЧ — 26680	6.9	15.7
МIP мужчин	Возраст, ОП, рост, ОГ, ИМТ, вес, МСМ, ОПП, ОГО	4 слоя: 6, 4, 3 и 3 нейрона, СЧ — 13080	9.3	13.6
МIP женщин	Возраст, ОП, рост, ОГ, ИМТ, вес, МСМ, ОПП, ОГО	4 слоя: 6, 4, 3 и 3 нейрона, СЧ — 15134	9.2	16.5
SNIP мужчин	Возраст, ОП, рост, ОГ, ИМТ, вес, МСМ, ОПП, ОГО	4 слоя: 6, 4, 3 и 3 нейрона, СЧ — 17960	9.9	10.3
SNIP женщин	Возраст, ОГ, ОПП, ОБ	4 слоя: 16, 3, 8, 10 нейрона, СЧ — 18288	11.5	16.6

Примечание. СЧ — случайное число.

Таблица 5

Сравнение точности различных моделей расчета должных величин силы дыхательных мышц

Показатель	СООА регрессионных моделей, %		СООА нейронных сетей, %
	ранее разработанные	авторские	
МЕР у мужчин	27.3 [17]	16.7	14.2
МЕР у женщин	26.6 [8]	26.4	15.7
МIP у мужчин	30.7 [8]	16.4	13.6
МIP у женщин	26.8 [10]	25.6	16.5
SNIP у мужчин	29.9 [16]	15.6	10.3
SNIP у женщин	51 [16]	32.8	16.6

ботанных были выбраны модели, имеющие минимальную СООА. Результаты сравнительного анализа показали, что наиболее точными были модели, построенные на основе нейронных сетей, уровень СООА которых достигал минимальных значений. К лучшим из них относились расчеты SNIP, МIP и МЕР у мужчин. Расчеты должных величин у женщин существенно (в 1.7—2 раза) повысили показатели точности регрессионных моделей авторов, но все же не достигали рекомендованного уровня СООА.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование силы дыхательных мышц получает все большее распространение в клинической физиологии в качестве дополнительного инструмента для комплексной оценки функционального состояния респираторной



системы при различных заболеваниях органов дыхания и сердечно-сосудистой системы, нейромышечной, церебро-васкулярной патологии и др. [1, 8]. Недостаточность дыхательных мышц, проявляющаяся их утомлением или слабостью, является патогенетическим фактором развития или усугубления вентиляционных нарушений, артериальной гипоксемии и гиперкапнии [12]. Точная информация о функциональном статусе моторного аппарата системы внешнего дыхания способствует своевременной диагностике его дисфункции и позволяет выбрать наиболее эффективные методы коррекции. Вместе с тем корректный анализ результатов исследования физиологических функций человека возможен только на основе сопоставления фактически измеренных величин с должными. Классическим примером такого сопоставления являются должные величины показателей функции внешнего дыхания, степень отклонения от которых указывает на выраженность вентиляционных нарушений. Этот подход относится к рутинным стандартам функциональной диагностики и широко используется в клинической практике. Определение должных величин силы дыхательных мышц связано с необходимостью ранней диагностики их дисфункции при многих патологических состояниях, в том числе требующих неотложной респираторной поддержки. Как показали результаты анализа, ранее разработанные модели должных величин MIP, MEP и SNIP имели высокий уровень СООА и не соответствовали рекомендованным стандартам точности, предъявляемым к регрессионным моделям в медико-биологических исследованиях [4]. Высокий уровень вариативности силовых характеристик дыхательных мышц и показателя СООА объясняют небольшим количеством обследуемых, их различной расовой принадлежностью и непрозрачностью методик измерения [8]. В регрессионных моделях, разработанных нами, были использованы дополнительные процедуры их «очистки» от факторов мультиколлинеарности. Кроме того, повышение точности моделей было связано с включением в их состав предикторов, косвенно характеризующих МСМ (окружности предплечья и бедра), что позволило повысить точность отдельных расчетов в 1.5—1.9 раза по сравнению с моделями, разработанными другими авторами.

Модели должных величин MEP, MIP и SNIP, построенные на основе нейронных сетей, существенно повышали их точность. Так, диапазон размаха СООА для мужчин соответствовал стандартам качества и составлял от 10.3 до 14.2 %, у женщин СООА была несколько ниже (15.7—16.6 %) рекомендуемого уровня. В сравнении с нейронными сетями линейные регрессионные модели демонстрировали недостаточную точность определения нормативных показателей.

Таким образом, использование нейронных сетей для моделирования должных величин силы дыхательных мышц позволяет стратифицировать пациентов по риску развития утомления или слабости дыхательных мышц, своевременно распознавать тяжесть этих состояний, а также осуществлять необходимую коррекцию нарушенных функций. Перспектива дальнейшего использования модели на основе искусственных нейронных сетей связана с разработкой информационного сервиса, который позволит в реальном времени рассчитывать персонализированные должные величины силы дыхательных мышц и сопоставлять их с фактическими измерениями в автоматическом режиме.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-29-03131.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Авдеев С. Н.* Оценка силы дыхательных мышц в клинической практике. Пульмонология и аллергология. 4: 12—17. 2008.
- [2] *Гельцер Б. И., Курпатов И. Г., Котельников В. Н.* Силовые характеристики дыхательных мышц у здоровых лиц: возрастные, гендерные и конституциональные особенности. Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. 103 (12): 1425—1433. 2017.
- [3] *Кабаков Р. И.* R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R. Пер. с англ. П. А. Волковой. М. ДМК Пресс. 2014.
- [4] *Мун С. А., Глушов А. Н., Штернис Т. А., Ларин С. А., Максимов С. А.* Регрессионный анализ в медико-биологических исследованиях. Кемерово. КемГМА. 2012.
- [5] *American Thoracic Society/European Respiratory Society.* ARS/ERS statement on respiratory muscle testing. Am. J. Respir. Crit. Care Med. 166: 518—624. 2002.
- [6] *Anastasiadis A., Magoulas G., Vrahatis V.* New globally convergent training scheme based on the resilient propagation algorithm. Neurocomputing. 16: 253—270. 2005.
- [7] *Black L. F., Hyatt R. E.* Maximal respiratory pressures: normal values and relationship to age and sex. Am. Rev. Respir. Disease. 99: 696—702. 1969.
- [8] *Evans J. A., Whitelaw W. A.* The assessment of maximal respiratory mouth pressures in adults. Respir. Care. 54 (10): 1348—1359. 2009.
- [9] *Flach P.* Machine learning. The art and science of algorithms that make sense of data. Cambridge University Press. 2012.
- [10] *Gopalakrishna A., Vaishali K., Prem V., Aaron P.* Normative values for maximal respiratory pressures in an Indian Mangalore population: A cross-sectional pilot study. Lung India. 28(4): 247—252. 2011.
- [11] *Hyndman R. J., Athanasopoulos G.* Forecasting: principles and practice. Sydney. Otexts. 2013.
- [12] *Nikoleitou D., Rafferty G., Man W. D., Mustafa N. et al.* Sniff nasal inspiratory pressure in patients with moderate-to-severe chronic obstructive pulmonary disease: learning effect and short-term between-session repeatability. Respiration. 88 (5): 365—370. 2014.
- [13] *O'Conner R., Segers L. S., Morris K. F., Nuding S. C. et al.* A joint computational respiratory neural network-biomechanical model for breathing and warway defensive behaviors. Front. Physiol. 3: 1—28. 2012.
- [14] *Perchiazzi G., Ryander Ch., Pallegriani M., Hogman M. et al.* Monitoring of total positive end-expiratory pressure during mechanical ventilation by artificial neural networks. J. Clin. Monitoring Computing. 31(3): 551—559. 2017.
- [15] *Riedmiller M.* Advanced supervised learning in multi-layer perceptrons — from back-propagation to adaptive learning algorithms. Intern. J. Computer Standards Interfaces. 16: 265—278. 1994.
- [16] *Uldrey Ch., Fitting J. W.* C in healthy subjects. Thorax. 50 (4): 371—375. 1995.
- [17] *Wilson S. H., Cooke N. T., Edwards R. H., Spiro S. G.* Predicted normal values for maximal respiratory pressures in caucasian adults and children. Thorax. 39 (7): 535—538. 1984.
- [18] *Zuur A. F., Ieno E. N., Elphick C. S.* A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. Methods Ecology Evolution. 1: 3—14. 2010.

Поступила 5 III 2018  
После доработки 19 VII 2018