

В.В. Петрова, П.А. Шулепов, Т.Д. Симагова, А.А. Петров

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАБОТНИКА РАДИАЦИОННО- И ЯДЕРНО-ОПАСНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Виктория Викторовна Петрова, e-mail: sportvrach@outlook.com

РЕФЕРАТ

Цель: Анализ возможностей прогностической модели оценки рисков патологии сердечно-сосудистой, церебро-васкулярной систем и психофизиологического состояния у работников радиационно- и ядерно-опасных предприятий и производств в рамках разработки концепции цифрового двойника.

Материал и методы: В исследовании приняли участие работники одного из ведущих радиационно- и ядерно-опасных предприятий, проходившие периодический медицинский осмотр на базе комплексного врачебного здравпункта III уровня ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России в сентябре–октябре 2022 г. Всего за время исследования было проанкетировано, обследовано и проанализирована медицинская документация 154 пациентов (115 мужчин и 39 женщин). Диагностические критерии факторов риска и других патологических состояний и заболеваний, повышающих вероятность развития хронических неинфекционных заболеваний, оценивались как в соответствии с приказами Минздрава РФ, так и с использованием цифровой прогностической модели ИИ-ГИППОКРАТ, разработанной ФИЦ ИУ РАН.

Результаты: В соответствии с критериями, указанными в приказах Минздрава РФ, выявлено, что высокие или очень высокие риски развития таких заболеваний как инфаркт, инсульт, гипертоническая болезнь и депрессия отмечаются у 120 чел. (77,9 %), а согласно анализу в системе ИИ-ГИППОКРАТ, данные риски встречаются у 131 чел. (85,1 %).

Заключение: В результате проведенного исследования проанализированы возможности системы ИИ-ГИППОКРАТ и даны следующие рекомендации по ее использованию у работников радиационно- и ядерно-опасных предприятий и производств: для минимизации расхождений между данными анкетирования пациентов и результатами периодических медицинских осмотров рекомендуется интеграция системы ИИ-ГИППОКРАТ в медицинскую информационную систему, используемую на предприятии (МИС Медиалог, МИС МИАС и пр.); для повышения информативности рекомендаций рекомендуется распределить представленные факторы риска на три группы: управляемые (на которые врач или пациент могут повлиять), условно-управляемые (влияние на которые может оказывать применение лекарственных средств) и неуправляемые, на которые врач и пациент повлиять не могут (например, пол, возраст и пр.); для улучшения качества результата полученной оценки рекомендуется поднять порог выставления риска того или иного заболевания до «высокий и выше».

Ключевые слова: прогностическая модель, цифровой двойник, оценка рисков, периодический медицинский осмотр, работники радиационно- и ядерно-опасных предприятия и производства, персонал

Для цитирования: Петрова В.В., Шулепов П.А., Симагова Т.Д., Петров А.А. Разработка концепции цифрового двойника работника радиационно- и ядерно-опасного предприятия и производства // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 1. С. 19–24. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-19-24

V.V. Petrova, P.A. Shulepov, T.D. Simagova, A.A. Petrov

The Concept of the Digital Twin of the Radiation and Nuclear Facilities' Worker

A.I. Burnazyana Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: V.V. Petrova, e-mail: sportvrach@outlook.com

ABSTRACT

Purpose: Analysis of the possibilities of a predictive model for assessing the risks of pathology of the cardiovascular, cerebrovascular systems and psychophysiological state in workers of radiation and nuclear hazardous enterprises and industries as part of the development of the concept of a digital twin.

Material and methods: The study involved employees of one of the leading radiation and nuclear hazardous enterprises, who underwent periodic medical examinations at comprehensive medical health center of the A.I. Burnazyana Federal Medical and Biological Center in September–October 2022. In total 154 patients (115 men and 39 women) were questioned, examined, and analyzed medical records. Diagnostic criteria for risk factors and other pathological conditions and diseases that increase the likelihood of developing chronic non-communicable diseases were evaluated both in accordance with the orders of the Ministry of Health and using the AI-HIPPOCRAT digital prognostic model developed by the Computer Science and Management Federal Research Center.

Results: In accordance with the criteria specified in the orders of the Ministry of Health, it was revealed that high or very high risks of developing diseases such as heart attack, stroke, hypertension and depression are observed in 120 people (77.9 %), and according to the analysis in the AI-HIPPOCRAT system, these risks occur in 131 people (85.1 %).

Conclusion: As a result of the study, the capabilities of the AI-HIPPOCRATE system were analyzed and the following recommendations were given for its use by workers of radiation and nuclear hazardous enterprises and industries: to integrate the AI-HIPPOCRAT system into the medical information system used at the enterprise; to divide the presented risk factors into three groups: manageable (on which the doctor or patient can influence), conditionally manageable (which can be influenced by the use of drugs) and uncontrollable, which the doctor and the patient cannot manage (for example, gender, age, etc.); to raise the threshold for setting the risk of a particular disease to “high and above”.

Keywords: *predictive model, digital twin, risk assessment, periodic medical examination, radiation and nuclear facilities, staff*

For citation: Petrova VV, Shulepov PA, Simagova TD, Petrov AA. The Concept of the Digital Twin of the Radiation and Nuclear Facilities' Worker. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2023;68(1):19–24. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-19-24

Введение

Двадцать первый век – эра цифровых технологий не только в промышленности, но и в медицине. Технологические достижения человечества позволяют современной медицине оценивать состояние здоровья человека как с точки зрения оценки работы его функциональных систем на всех уровнях (ткани, клетки, геном), так и в связке с его психоэмоциональным состоянием и окружением, что открывает в медицине новую главу – персонафикацию.

Термин «цифровой двойник» в настоящее время используется для описания цифровой копии физического существующего объекта (устройства, машины, человека и др.). Для этого «цифровой двойник» должен обладать следующими характеристиками: содержать все процессы и операции, связанные с физическим двойником; иметь возможность представлять физического двойника в реальном мире; всегда иметь актуальные данные о своем физическом двойнике (возможность непрерывной синхронизации данных); показывать моделируемое поведение физического двойника [1].

Если говорить о цифровом двойнике человека, то концепция развития этого направления основывается на анализе биологических, физических, психологических и социальных аспектов его личности.

С развитием персонализированного подхода в здравоохранении человека все больше и больше окружают его собственные «цифровые двойники», представляющие собой срез медицинских данных.

Уже сейчас ведутся работы по расчету модели поведения человеческого сердца. Модель может быть построена на основе всей совокупности данных о сердце (например, частоты сердечных сокращений, результатов электрокардиограммы, результатов МРТ сердца, артериального давления, биопсии мышечной ткани и пр.). Рассчитанная модель совершенно точно покажет работу сердца и тем самым поможет кардиологам, показывая точную форму реального сердца пациента, а также его размеры, перегородки, фракцию выброса, активацию электрического сигнала и изменения артериального давления. Такие данные способны помочь кардиологу лучше контролировать поведение сердца при назначении той или иной терапии, а также оптимизировать план лечения до возникновения необходимости оперативного вмешательства. Подобный «цифровой двойник» сердца – настоящее будущее персонализированной медицины [2].

Однако, в целом, человеческий «двойник» не может содержать в себе лишь набор биологических данных. Если модель должна отражать все аспекты человеческой жизни с его рождения до самой смерти, то помимо биологической информации о жизненно важных органах и системах необходимо учитывать умственную деятельность человека (его мышление, знания и идеи), его физическую деятельность (хобби, спорт, работа, пищевое поведение, привычки) а также социальное поведение, включая взаимодействие с людьми, как реальное, так и виртуальное [3].

Профессиональная деятельность работников радиационно- и ядерно-опасных предприятий и производств сопряжена как с высокой ответственностью, так и с вы-

сокими рисками, требующими особого внимания к физическому и психологическому здоровью. Учитывая высокую потребность в медико-психологическом обеспечении данной категории лиц, крайне актуальной задачей является создание «цифрового двойника» для дистанционного (бесконтактного) контроля и прогнозирования психоэмоционального и физиологического состояния и выявления признаков девиантного поведения операторов критических и удаленных объектов.

В целях подтверждения необходимости внедрения данной концепции в систему медико-биологического сопровождения был проведен анализ данных последнего периодического медицинского обследования работников одного из ведущих радиационно- и ядерно-опасных предприятий.

Материал и методы

Периодический медицинский осмотр работников одного из ведущих радиационно- и ядерно-опасных предприятий был проведен на базе комплексного врачебного здравпункта III уровня им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Всего за время исследования было проведено обследование и осуществлен анализ медицинской документации 184 пациентов. Критерием включения в исследование было наличие вредного производственного фактора (ионизирующего излучения К, радиоактивные вещества К) и/или должности, относящейся к научным работникам, медицинскому или инженерно-техническому персоналу. Не соответствующие данным критерием пациенты были исключены из дальнейшего анализа, всего было проанализировано 154 пациента (115 мужчин и 39 женщин).

Периодический медицинский осмотр был проведен в объеме согласно действующим приказам Минздрава России № 749н (от 28.07.2020), № 29н (от 28.01.2021) и № 404н (от 27.04.2021).

Помимо осмотра каждый из 154 обследованных пациентов заполнил анкету, состоящую из вопросов, характеризующих следующие аспекты здоровья: болезни и семейный анамнез, образ жизни, питание, среда и социальный статус, события жизни, а также опросники текущего психологического состояния («Шкала дисфункциональных отношений» А. Бека и А. Вейсмана и «Диагностика самооффективности» Маддукса и Шеера).

Результаты и обсуждение

Согласно порядку проведения профилактического медицинского осмотра и диспансеризации определенных групп взрослого населения установлены диагностические критерии факторов риска и других патологических состояний и заболеваний, повышающих вероятность развития хронических неинфекционных заболеваний.

В соответствии с данными критериями в группах обследованных лиц было выявлено:

1. Повышенный уровень артериального давления – 70 пациентов.
2. Гиперхолестеринемия – 36 пациентов.
3. Гипергликемия – 18 пациентов.
4. Курение табака – 44 пациента.

5. Нерациональное питание – 38 пациентов.
6. Избыточная масса тела – 47 пациентов.
7. Ожирение – 37 пациентов.
8. Отягощенная наследственность по сердечно-сосудистым заболеваниям – 8 пациентов.
9. Отягощенная наследственность по злокачественным новообразованиям – 3 пациента.
10. Отягощенная наследственность по хроническим болезням нижних дыхательных путей – не выявлено.
11. Отягощенная наследственность по сахарному диабету – 3 пациента.

Количество выявленных отклонений в состоянии здоровья и их половые отличия по итогам инструментальных обследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Встречаемость отклонений в состоянии здоровья работников радиационно- и ядерно-опасного предприятия по данным ультразвукового исследования и ЭКГ
The incidence of deviations in the state of health of employees of a radiation- and nuclear-hazardous enterprise according to ultrasound and ECG data

Возрастная группа (согласно рекомендациям ВОЗ)	Количество выявленных отклонений (УЗИ органов малого таза, УЗИ щитовидной железы, УЗИ органов брюшной полости, ЭКГ)	
	Мужчины	Женщины
Молодой возраст (18–44)	42	11
Средний возраст (45–59)	36	13
Пожилой возраст (60–74)	78	17
Старческий возраст (75–90)	19	3
ВСЕГО:	175	44

Обращает на себя внимание рост количества выявленных отклонений по данным УЗИ щитовидной железы и ЭКГ в зависимости от возраста, наименьшее количество выявлено в группе молодых пациентов, наибольшее – у пожилых. Исключение составили данные УЗИ органов брюшной полости. При проведении этого вида обследования в группе молодых пациентов выявлены патологические изменения у 33 чел. из 42, что требует повышенного внимания и динамического наблюдения.

Процент встречаемости пациентов с отклонениями, при проведении инструментальных методов клинического обследования представлен на рис. 1.

При проведении анализа встречаемости пациентов с отклонениями (по данным УЗИ щитовидной железы и органов брюшной полости, а также ЭКГ) разных возрастных категорий (пациенты мужского пола, научные работники и инженерно-технический персонал) рост проблем со здоровьем в зависимости от возраста становится очевиден. Так, в группе молодых пациентов наибольший процент встречаемости отсутствия патологических отклонений – 24 %, в среднем возрасте – 4 % и в пожилом – 2 %. Один риск выявлен в 55, 39 и 15 % соответственно. Максимальное количество пациентов с тремя и более отклонениями наблюдается в группе пожилых пациентов и составляет 18 %.

Психофизиологическое состояние пациентов оценивалось по вариабельности сердечного ритма, методике многостороннего исследования личности, реакции на движущийся объект, сложной сенсомоторной реакции и простой сенсомоторной реакции. Обследование проводилось только в группах научных работников и инженерно-технического персонала [4, 5].

Количество выявленных отклонений по результатам реакции на движущийся объект, сложной сенсомоторной реакции и простой сенсомоторной реакции представлено в табл. 2.

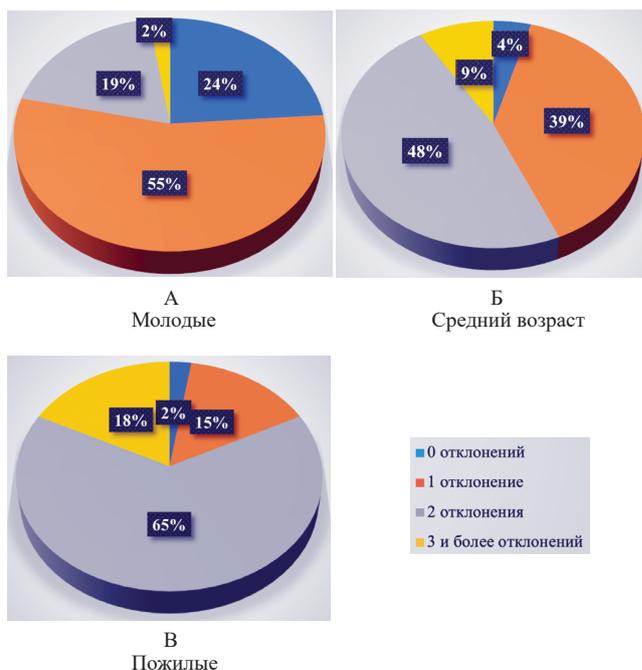


Рис. 1. Процент встречаемости пациентов с отклонениями по данным УЗИ щитовидной железы (УЗИ ЩЗ), УЗИ органов брюшной полости (УЗИ ОБП) и ЭКГ в зависимости от возрастной категории (пациенты мужского пола). А – Молодые пациенты (18–44 лет, n=42); Б – Пациенты среднего возраста (45–59 лет, n=23); В – Пожилые пациенты (60–74 лет, n=40)

Fig.1. The percentage of occurrence of patients with abnormalities during ultrasound of the thyroid gland, ultrasound of the abdominal organs and ECG, depending on the age category (male patients). А – Young patients (18–44 years old, n=42); Б – Patients of middle age (45–59 years old, n=23); В – Elderly patients (60–74 years old, n=40)

Таблица 2

Встречаемость отклонений в состоянии здоровья работников радиационно- и ядерно-опасного предприятия по данным реакции на движущийся объект, сложной сенсомоторной реакции и простой сенсомоторной реакции
The incidence of deviations in the state of health of employees of a radiation- and nuclear-hazardous enterprise according to the reaction to a moving object, complex sensorimotor reaction and simple sensorimotor reaction

Возрастная группа (согласно рекомендациям ВОЗ)	Количество выявленных отклонений (реакция на движущийся объект, сложная сенсомоторная реакция и простая сенсомоторная реакция)	
	Мужчины	Женщины
Молодой возраст (18–44)	22	8
Средний возраст (45–59)	19	9
Пожилой возраст (60–74)	46	5
Старческий возраст (75–90)	17	2
ВСЕГО:	104	24

Из набора анализируемых показателей психологического и психофизиологического тестирования худшие результаты вне зависимости от возраста у показателей среднего времени тестов ПСМР и ССМР при малом количестве ошибочных ответов. В группе молодых пациентов большое время реакции при тесте ПСМР выявлено у 4 чел., у пациентов среднего возраста – у 7 чел., у пожилых пациентов – у 15 чел. При проведении ССМР данный показатель выходил за пределы нормальных значений у 15, 19 и 23 чел. соответственно. Данную тенденцию можно объяснить тем, что психофизиологическое обследование проводится на заключительном этапе диспансеризации и на результаты повлияла общая усталость.

По результатам многостороннего исследования личности (тест ММИЛ) был выявлен риск склонности к депрессии у 4 пациентов, двое из которых в группе пожилого возраста.

Процент встречаемости пациентов с отклонениями, при проведении психологического и психофизиологического тестирования представлен на рис. 2.

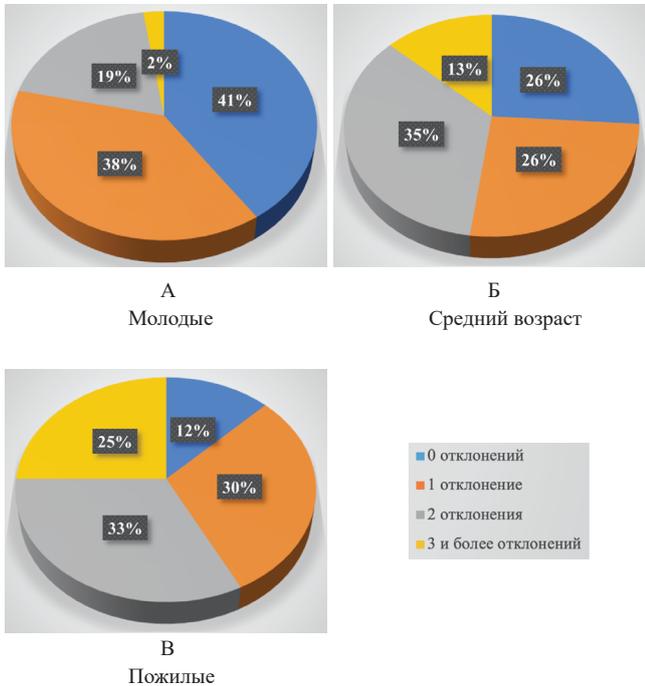


Рис. 2. Процент встречаемости пациентов с отклонениями, при проведении психологического тестирования (ММИЛ), простой и сложной сенсорных реакций (ПСМР, ССМР) и реакции на движущийся объект (РДО) в зависимости от возрастной категории (пациенты мужского пола, категория персонала – научные работники и инженерно-технический персонал). А – Молодые пациенты (18–44 лет, n=42); Б – Пациенты среднего возраста (45–59 лет, n=23); В – Пожилые пациенты (60–74 лет, n=40)

Fig.2. The percentage of occurrence of patients with deviations during psychological testing (ММТS), simple and complex sensorimotor reactions (PSMR, SSMR) and reactions to a moving object (RDO) depending on the age category (male patients, personnel category - scientists and engineering staff). A – Young patients (18–44 years old, n=42); Б – Patients of middle age (45–59 years old, n=23); В – Elderly patients (60–74 years old, n=40)

Анализируя встречаемость пациентов с отклонениями (по данным ММИЛ, ССМР, ПСМР и РДО) в зависимости от возрастной категории (пациенты мужского пола, научные работники и инженерно-технический персонал) выявлено увеличение количества отклонений при взрослении пациентов. Так, в группе молодых пациентов наибольший процент встречаемости отсутствия отклонений – 41 %, в среднем возрасте – 26 % и в пожилом возрасте – 12 %. Отклонения по одному показателю выявлен в 38, 26 и 30 %, соответственно. Максимальное количество пациентов с тремя и более отклонениями наблюдается в группе пожилых пациентов и составляет 25 %.

Данные пациентов мужского пола старше 75 лет и пациентов женского пола всех возрастных групп анализу не подвергались ввиду их малочисленности.

Для оценки факторов риска развития некоторых заболеваний (инфаркт, инсульт, гипертоническая болезнь и депрессия) у работников радиационно- и ядерно-опасного предприятия и производства была проанализирована прогностическая модель в виде компьютери-

зированной системы на основе облачных технологий автоматизированной обработки данных с применением искусственного интеллекта.

Система при помощи опроса (анкетирования) пациентов проанализировала введенные данные и предоставила ранжированный прогноз развития некоторых заболеваний по уровню соответствующего риска, как показано в табл. 3.

Таблица 3

Уровни риска развития некоторых заболеваний (инфаркт, инсульт, гипертоническая болезнь и депрессия) в компьютерной системе

Risk levels for the development of certain diseases (heart attack, stroke, hypertension and depression) in a computer system

Уровни риска	Инфаркт	Инсульт	Гипертоническая болезнь	Депрессия
Очень низкий	+	+	–	+
Низкий	+	+	+	+
Средний	+	+	+	+
Высокий	+	+	+	+
Очень высокий	+	+	–	+

В качестве определения опорных точек для выставления того или иного уровня риска соответствующего заболевания система проводила многофакторный анализ полученных ответов. Некоторые основные категории ответов, влияющие на постановку уровня риска представлены в табл. 4.

Каждой категории ответов присваивается соответствующий риск, который накладывается на другой, после чего системой оцениваются все уровни риска и выставляется итоговая оценка (по наивысшему уровню). Остальные факторы (которые относятся к более низким уровням) также отображаются в итоговой оценке. Распределение количества выставленных рисков по всем категориям пациентов представлено в табл. 5 и на рис. 3.

Риски развития некоторых заболеваний

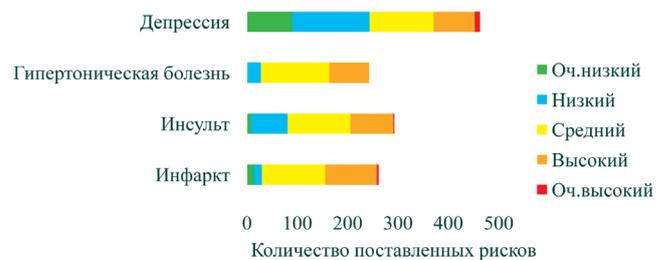


Рис. 3. Количество выявленных рисков развития некоторых заболеваний в компьютерной системе в группе 154 обследованных пациентов

Fig.3. The number of identified risks of developing certain diseases in a computer system in a group of 154 examined patients

Таким образом, согласно анализу в компьютерной системе, у 131 пациента (85 % всех обследованных) наблюдаются высокие или очень высокие риски развития тех или иных заболеваний.

Заключение

В результате проведенного исследования проанализированы возможности прогностической модели оценки рисков патологии сердечно-сосудистой, церебро-васкулярной систем и психофизиологического состояния у работников радиационно- и ядерно-опасных предприятий и производств.

В соответствии с выбранными критериями включе-

Таблица 4

Основные категории ответов пациентов, влияющие на определение уровня риска развития некоторых заболеваний (инфаркт, инсульт, гипертоническая болезнь и депрессия) в компьютерной системе

The main categories of patient responses that affect the setting of the risk level for the development of certain diseases (heart attack, stroke, hypertension and depression) in a computer system

Уровни риска	Инфаркт	Инсульт	Гипертоническая болезнь	Депрессия
Очень низкий	– курение	– пол	–	– пол – питание – двигательная активность
Низкий	– пол – курение	– пол – семейный анамнез – курение – алкоголь – наличие жалоб/болей	– пол – курение – алкоголь	– пол – жизненные невзгоды – рабочая нагрузка – недостаток света – активность в соцсетях – постоянный прием лекарств
Средний	– пол – питание – двигательная активность – наличие диагнозов – уровень стресса – курение	– пол – наличие жалоб/болей – питание – наличие диагнозов – двигательная активность – рабочая нагрузка – семейный анамнез	– пол – профессиональная вредность – двигательная активность – уровень стресса – питание	– трагедии в прошлом – наличие диагнозов – жизненные невзгоды – рабочая нагрузка – наличие болей – плохая самооценка – низкая самоэффективность
Высокий	– пол – образ жизни – трагедии в прошлом – наличие диагнозов – курение – семейный анамнез	– пол – двигательная активность – наличие диагнозов – наличие жалоб/болей – курение – семейный анамнез – головокружения	– пол – трагедия в прошлом – наличие диагнозов – семейный анамнез – уровень стресса – курение	– плохое качество сна – высокий уровень дисфункционального мышления – трагедии в прошлом – жизненные невзгоды – уровень стресса
Очень высокий	– наличие диагнозов – наличие прошлых инфарктов	– сильные продолжительные головокружения – постоянная слабость	–	– эпизоды депрессии в прошлом – трагедии в прошлом – семейный анамнез

Таблица 5

Распределение количества выявленных уровней риска развития некоторых заболеваний (инфаркт, инсульт, гипертоническая болезнь и депрессия) в компьютерной системе у 154 обследованных пациентов

Distribution of the number of identified risk levels for the development of certain diseases (heart attack, stroke, hypertension and depression) in a computer system in 154 examined patients

Уровни риска	Инфаркт	Инсульт	Гипертоническая болезнь	Депрессия
Очень низкий	14	8	–	90
Низкий	16	73	28	154
Средний	126	125	136	127
Высокий	102	85	79	82
Очень высокий	4	2	–	10
ВСЕГО:	262	293	243	463

ния у 154 выбранных пациентов была проведена оценка факторов производственного риска в целях своевременного выявления и профилактики некоторых заболеваний (артериальной гипертонии, инфаркта миокарда, инсульта и депрессии).

Сформулированы следующие рекомендации по возможностям использования компьютерной системы у работников радиационно- и ядерно-опасных предприятий и производств:

1. В целях минимизации расхождений между данными анкетирования пациентов и результатами периодических медицинских осмотров рекомендуется интеграция компьютерной системы в медицинскую информационную систему, использующуюся на предприятии (МИС Медиалог, МИС МИАС и пр.).
2. В целях улучшения информативности рекомендаций для отображения врачу рекомендуется распределить представленные факторы риска на три группы: управляемые (на которые врач или пациент могут

повлиять), условно-управляемые (влияние на которые может оказывать применение лекарственных средств) и неуправляемые, на которые врач и пациент повлиять не могут (например, пол, возраст и пр.). При этом рекомендуется учитывать все группы при постановке окончательного уровня риска.

3. В целях более качественного результата полученной оценки рекомендуется поднять порог отображения уровня риска того или иного заболевания до «высокий и выше». В случае получения общего уровня «средний» и ниже рекомендуется скрыть его отображение за кнопкой «для информации» (например). В качестве продолжения исследования рекомендуется обратить внимание на следующие аспекты:
 1. Целесообразно рассмотреть добавление генерации выходного протокола работы системы для вывода на печать.
 2. Целесообразно рассмотреть добавление рекомендаций по снижению рисков, адресованных цеховым и участковым врачам.
 3. Повышение безопасности наполняемой базы данных (наличие зашифрованного канала связи) в соответствии с рекомендациями служб безопасности соответствующих предприятий, где проходят предсменные обследования работников с участием цеховых врачей.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах», направление 9.3 «Разработка и исследование технологий искусственного интеллекта для профилактической медицины, психодиагностики и биометрии»).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bruynseels K., Santoni de Sio F., van den Hoven J. Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm // *Front. Genet.* 2018. No. 9. P. 31. DOI: 10.3389/fgene.2018.00031.
2. Torkamani A., et al. High-Definition Medicine // *Cell.* 2017. V.170, No. 5. P. 828-843. DOI: 10.1016/j.cell.2017.08.007.
3. Sahal R., Alsamhi S.H., Brown K.N. Personal Digital Twin: A Close Look into the Present and a Step towards the Future of Personalised Healthcare Industry // *Sensors.* 2022. V.22, No. 15. P. 5918. DOI: 10.3390/s22155918.
4. Бобров А. Ф., Иванов В. В., Калинина М. Ю., Новикова Т. М., Ратаева В. В., Седин В. И. и др. Инновационная технология предметного психофизиологического обследования персонала как средство повышения радиационной безопасности // *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2018. Т.63, № 5. С. 5-10. DOI: 10.12737/article_5bc895f377f578.86526226.
5. Торубаров Ф.С., Бушманов А.Ю., Зверева З.Ф., Кретов А.С., Лукьянова С.Н., Денисова Е.А. Концепция психофизиологического обследования персонала объектов использования атомной энергии в медицинских организациях // *Медицина экстремальных ситуаций.* 2021. Т.23, № 1. С. 12-17. DOI: 10.47183/mes.2021.008.

REFERENCES

1. Bruynseels K., Santoni de Sio F., van den Hoven J. Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm. *Front. Genet.* 2018;9:31. DOI: 10.3389/fgene.2018.00031.
2. Torkamani A., et al. High-Definition Medicine. *Cell.* 2017;170;5:828-843. DOI: 10.1016/j.cell.2017.08.007.
3. Sahal R., Alsamhi S.H., Brown K.N. Personal Digital Twin: A Close Look into the Present and a Step towards the Future of Personalised Healthcare Industry. *Sensors.* 2022;22;15:5918. DOI: 10.3390/s22155918.
4. Bobrov A. F., Ivanov V. V., Kalinina M. YU., Novikova T. M., Ratayeva V. V., Sedin V. I., et al. Innovative Technologies of Pre-Shift Psychophysiological Control of Personnel as Means of Increasing Safety of Radiation and Nuclear Enterprises and Objects of the State Atomic Energy Corporation ROSATOM. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety.* 2018;63;5:5-10. DOI: 10.12737/article_5bc895f377f578.86526226.
5. Torubarov F.S., Bushmanov A.Yu., Zvereva Z.F., Kretov A.S., Lukyanova S.N., Denisova Ye.A. Concept of Medical Psychophysiological Examination of Personnel of Nuclear Facilities. *Meditsina Ekstremalnykh Situatsiy = Extreme Medicine.* 2021;23;1:12-17. DOI: 10.47183/mes.2021.008.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. ФИЦ ИУ РАН.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.09.2022. **Принята к публикации:** 25.11.2022.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. FITZ IU RAS.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.09.2022. **Accepted for publication:** 25.11.2022.