

ISSN (print) 0869-5873
ISSN (online) 3034-5200



Российская Академия Наук

Номер 8

Август 2025



ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

HERALD OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 8, 2025

С кафедры президиума РАН

<i>М.А. Гузев, В.М. Чудновский, И.А. Абушкин</i> Применение кавитации на лазерном нагревательном элементе в хирургии	3
<i>Ю.В. Василевский</i> Персонализированные математические модели как диагностический и прогностический инструмент клинициста	15
<i>Ю.Н. Орлов</i> Методы искусственного интеллекта в медицине	30
<i>В.Г. Акимкин</i> Перспективы цифровизации в эпидемиологии	38
<i>А.И. Аветисян</i> Интеллектуальный анализ данных в медицине: вызовы и возможности	53

Точка зрения

<i>И.П. Цапенко, К.А. Субхангулова</i> Центры миграционной силы в мировой политике	58
---	----

За рубежом

<i>И.Г. Дежина</i> Развитие связей с индустрией в области исследований и разработок на примере ведущих университетов США	71
---	----

Былое

<i>А.А. Горский</i> Куликовская битва в контексте отношений Руси и Орды второй половины XIV в. <i>К 645-летию битвы на Куликовом поле</i>	82
<i>М.Д. Бухарин</i> Деятельность Ш.Я. Амиранашвили в ходе кампании по передаче грузинских ценностей из российских собраний в 1922–1923 гг.	88

Официальный отдел

Награды и премии	96
------------------	----

CONTENTS

No. 8, 2025

From the Rostrum of the RAS Presidium

- M.A. Guzev, V.M. Chudnovskii, I.A. Abushkin*
Application of cavitation on a laser heating element in surgery 3
- Yu.V. Vassilevski*
Personalized mathematical models as a diagnostic and prognostic tool of the clinician 15
- Yu.N. Orlov*
Application of artificial intelligence methods in medicine 30
- V.G. Akimkin*
Prospects of digitalization in epidemiology 38
- A.I. Avetisyan*
Intelligent data mining in medicine: challenges and opportunities 53

Point of view

- I.P. Tsapenko, K.A. Subkhangulova*
Migration power centers in world politics 58

Abroad

- I.G. Dezhina*
Developing links with industry in research and development: the example of leading US universities 71

Bygone times

- A.A. Gorskii*
The Battle of Kulikovo in the context of relations between rus' and the horde in the second half of the 14th century
On the 645th anniversary of the Battle on Kulikovo field 82
- M.D. Bukharin*
Activities of Sh.Ya. Amiranashvili during the campaign to transfer georgian values from Russian collections in 1922–1923 88

Official Section

- Awards and prizes 96
-

ПРИМЕНЕНИЕ КАВИТАЦИИ НА ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ В ХИРУРГИИ

© 2025 г. М.А. Гузев^{а,*}, В.М. Чудновский^{б,**}, И.А. Абушкин^{с,***}

^аИнститут прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия

^бТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

^сЮжно-Уральский государственный медицинский университет Минздрава России, Челябинск, Россия

*E-mail: guzev@iam.dvo.ru

**E-mail: vm53@mail.ru

***E-mail: ivanabushkin@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2025 г.

После доработки 24.03.2025 г.

Принята к публикации 10.05.2025 г.

В статье рассматривается явление лазерной кавитации, инициированной на кончике погружённого в жидкость оптоволокну под действием непрерывного лазерного излучения. Исследуются свойства затопленных кумулятивных струй, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков. Показано, что в свободном пространстве струи переносят тепло через жидкость, а в случае кавитации внутри заполненной жидкостью трубки приводят к инверсионному движению жидкости. Практическое использование установленных эффектов в медицине позволяет более успешно проводить хирургическое лечение сосудистых заболеваний, кист, острых и хронических инфицированных ран.

Ключевые слова: лазер, кавитация, численное моделирование, острые и хронические инфицированные раны, коагуляция кист и сосудов.

DOI: 10.31857/S0869587325080016, **EDN:** DSVYFC

Разработка биомедицинских технологий — необходимое условие развития высокотехнологичной медицинской помощи. Малоинвазивные медицинские технологии с использованием лазерного излучения позволяют совершенствовать терапию в случае устойчивости микроорганизмов к антибиотикам, гипоксии тканей и нарушения иммунного статуса пациента. В частности, при лечении острых и хронических инфицированных ран и сосудистых заболеваний лазерные малоинвазивные технологии,

помимо радикального сокращения сроков выздоровления, существенно снижают риск осложнений, в том числе инфекционных.

Свойства лазерной кавитации. Учёные из Института прикладной математики ДВО РАН (ИПМ ДВО РАН), Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) и Южно-Уральского государственного медицинского университета (ЮУГМУ) предложили новый способ лечения ран и устранения патологических



ГУЗЕВ Михаил Александрович — академик РАН, директор ИПМ ДВО РАН. ЧУДНОВСКИЙ Владимир Михайлович — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ТОИ ДВО РАН. АБУШКИН Иван Алексеевич — доктор медицинских наук, профессор кафедры общей и детской хирургии ЮУГМУ.

образований в биологических тканях. Работа медицинского комплекса, который помогает на практике реализовать предложенный подход, основана на применении обнаруженных в ходе исследований свойств лазерной кавитации.

Первое свойство заключается в возможности лазерного нагрева внутренней поверхности полости, заполненной жидкостью, без существенного увеличения температуры всего объема этой жидкости. Это помогает избежать ожога соседних нормально функционирующих анатомических структур. Практическое приложение данного эффекта в медицине позволяет выполнять коагуляцию таких патологических образований, как кисты, мальформации (клубки кровеносных сосудов), варикозное расширение вен и др.

Второе свойство связано с инверсионным ускоренным движением жидкости, которое возникает при кавитации на лазерном нагревательном элементе, помещённом в трубку. Этот эффект используется при лечении инфицированных острых и хронических ран. Лазерная кавитация способствует ускоренному движению жидкости как вдоль поверхности раны, так и в трубке, что подавляет жизнедеятельность бактерий и одновременно выносит продукты воспаления за пределы поражённой зоны. Таким образом стимулируются защитные механизмы в самой ране и её активное заживление.

Рассмотрим выявленные в ходе исследования физические аспекты лазерной кавитации и её свойства. Кавитация — это образование полостей внутри изначально однородной жидкой среды. Под термином “лазерная кавитация” обычно подразумевают кавитацию, инициированную в жидкости сфокусированным импульсным лазерным излучением [1, 2], которое приводит к нагреву и вскипанию жидкости. При схлопывании кавитационного пузырька формируются кумулятивные струи, которые широко распространены в технических приложениях, биологии и медицине [1–7]. Интерес к лазерной кавитации стремительно растёт, особенно с внедрением импульсного лазерного излучения.

В наших исследованиях применялось непрерывное лазерное излучение, а для нагрева жидкости служило оптоволокно, которое позволяет концентрировать энергию излучения вблизи его торца. В хирургии обычно используют волокна с диаметром кварца 0.1–0.6 мм, поэтому уже при мощности излучения 1 Вт на выходном торце такого световода интенсивность излучения имеет величину порядка 127–3.5 МВт/м². При конверсии излучения в тепло торец оптоволоконного становится нагревательным элементом, генерирующим мощные тепловые потоки.

Эффективность конверсии лазерного излучения в тепло в воде зависит от длины волны, поскольку для разных длин волн коэффициент поглощения излучения в воде различается. Так, излучение с длинами волн 1.47, 1.56 и 1.94 мкм хорошо поглощается водой

с коэффициентами 24, 10 и 100 см⁻¹ соответственно, а излучение с длиной волны 0.97 мкм поглощается слабо с коэффициентом порядка 0.47 см⁻¹. Чтобы при излучении 0.97 мкм кончик оптоволоконного превратился в нагревательный элемент, на торец нужно нанести слой поглощающего излучение вещества, например, углерода, который можно сформировать при прикосновении кончика оптоволоконного к дереву или картону в момент работы лазера. Излучение, проходящее по оптоволоконному, вызовет возгорание дерева или картона, в результате чего на торце образуется слой углерода (так называемое чернение световода). Этот слой толщиной в среднем 50–100 мкм будет эффективно поглощать проходящее излучение и разогреваться. Показано, что в этом случае в тепло конвертируется от 10 до 30% лазерного излучения. Можно покрыть торец оптически более плотными веществами, например, оксидом железа (FeO). Тогда слой окажется практически непрозрачным, и всё излучение пойдёт на разогрев. Так создаются конверторы лазерного излучения, которые широко применяются в технике и медицине [8]. Конвертор обеспечивает поверхностный нагрев и вскипание жидкости. Если используется излучение с большим коэффициентом поглощения, то в нанесении поглощающего слоя нет необходимости. В этом случае лазерное излучение выходит за пределы торца оптоволоконного и поглощается, что обеспечивает объёмный нагрев жидкости вокруг кончика оптоволоконного, который может инициировать вскипание. Если волокно погрузить в воду и подать по нему коротковолновое инфракрасное излучение, то на его торце образуется затопленная струя (рис. 1) [9, 10].

Затопленная струя представляет собой разогретый поток жидкости с микропузырьками. Чтобы определить, как она нагревается во времени, в поток



Рис. 1. Затопленная струя нагретой жидкости, распространяющаяся от торца оптоволоконного с диаметром по кварцу 0.6 мм, на который нанесён слой углерода, поглощающий лазерное излучение с длиной волны 0.97 мкм (подсветка зелёным излучением пилотного лазера)

были установлены термопары К-типа на расстоянии 0.5 и 1 см от торца оптоволокну. Эксперименты проводились в шприце объемом 10 мл с внутренним диаметром 4 мм, заполненным физиологическим раствором (0.9% NaCl). Использовались лазерное излучение с длиной волны 1.94, 1.56 и 0.97 мкм и комбинация излучений 1.56 и 1.94 мкм. Измерения проводились с момента включения лазерной установки. Температура физиологического раствора в шприце составляла 27°C. При выборе расстояния от торца оптоволокну до термопары мы исходили из соображений, что в случае длин волн 1.56 и 1.94 мкм и их комбинации излучение полностью поглощается в слое воды, существенно меньшем 0.5 см. Согласно измерениям, скорость переноса тепла в струе, определяемая как отношение температуры ко времени для различных расстояний от торца оптоволокну, тем выше, чем ближе к источнику тепла находится точка измерения. На расстоянии 0.5 см термопара быстрее всего нагревается до температуры необратимой денатурации белков (60°C) при лазерном излучении с длиной волны 1.56 мкм со скоростью нагрева ~2.4°C/с.

При комбинированном воздействии лазерного излучения (1.56 и 1.9 мкм) скорость нагрева жидкости составляет ~1°C/с, а при излучении с длиной волны 1.94 мкм — 0.9°C/с. Лазерное излучение с длиной волны 0.97 мкм очень слабо поглощается водой и засвечивает термопару (прямое попадание излучения), что приводит к очень быстрому нагреву в первые секунды работы лазера, однако впоследствии из-за теплообмена с окружающей средой скорость нагрева термопары уменьшается до 1.5°C/с. На расстоянии 1 см от торца оптоволокну скорость нагрева жидкости для различных длин волн приблизительно составляет 1°C/с, что характерно для установившегося потока жидкости в затопленной струе. Попадая на детекти-

рующий участок термопары, пузырьки провоцируют резкий скачок температуры на её поверхности. Исключение составляет температурная кривая, полученная для излучения с длиной волны 0.97 мкм. Поскольку такое излучение очень слабо поглощается водой, рост температуры, особенно на расстоянии 0.5 см, в значительной степени обусловлен засветкой термопары излучением, которое прошло через воду. Важно, что уже в радиусе 1 мм от потока температура не превышает изначальных показателей окружающей среды. Таким образом, жидкость, нагретая лазерным излучением, полностью локализуется в струйном потоке, который переносит тепло сквозь окружение, при этом температура окружающей жидкой среды увеличивается незначительно.

На рисунке 2 (верхний ряд) приведена теневая видеограмма затопленных струй, возникающих на разогретом торце оптоволокну при мощности лазера 7, 5, 3 и 1.5 Вт соответственно. В нижнем ряду показано распространение горячих жидких струй в разные моменты времени при мощности лазерного излучения 3 Вт. При столкновении со стенками струи растекаются по их внутренней поверхности, передавая им тепло. Жидкость, нагретая лазерным излучением, полностью локализована в струйном потоке, который переносит тепло сквозь холодное окружение (жидкость, не достигшая температуры насыщения).

Способность затопленных струй переносить тепло сквозь холодную окружающую жидкость и нагревать внутренние замкнутые оболочки заполненной полости подтверждены в ходе математического моделирования этого процесса [11–14]. Результаты моделирования позволяют анализировать сценарии лазерной кавитации при различных значениях физических параметров без дополнительных экспериментальных исследований.

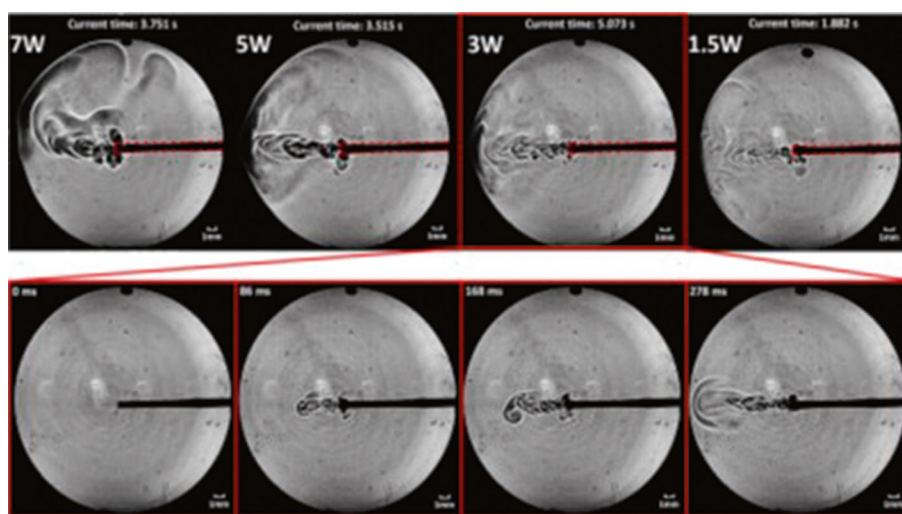


Рис. 2. Теневое фото затопленных струй горячей жидкости внутри кюветы при мощности лазера 7, 5, 3 и 1.5 Вт (вверху) и положение горячей струи в разные моменты времени при мощности 3 Вт (внизу)

Рассмотренный выше эффект инверсионного ускоренного движения жидкости (второе свойство лазерной кавитации) наблюдается при нагреве жидкости в трубке конечной длины. Трубка, открытая с обоих концов, погружена в заполненную жидкостью кювету, дно которой находится на некотором расстоянии от нижнего конца трубки. На рисунке 3 представлены результаты эксперимента для кюветы, дно которой сделано из листа бумаги, подвергнутого изгибу. В трубке находилось оптоволокно диаметром 0.6 мм, кончик которого был погружён в воду.

По оптоволокну распространялось лазерное излучение мощностью 7 Вт с длиной волны 1.47 мкм. Наблюдался рост и схлопывание парового пузырька на торце оптоволокну, расположенного в центре стеклянной трубки с внутренним диаметром 3 мм и толщиной стенок 1 мм. Расстояние от торца оптоволокну до дна кюветы (листа бумаги) — 0.5 мм.

На кадрах 5–8 отчётливо видно, что лист бумаги в процессе схлопывания пузырька выгибается в сторону трубки и после завершения этого процесса возвращается в исходное положение. Изгиб

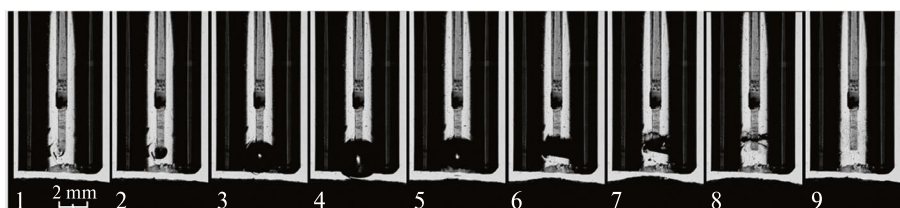


Рис. 3. Кадры роста и схлопывания парового пузырька в окрестности кончика оптоволокну, размещённого в стеклянной трубке

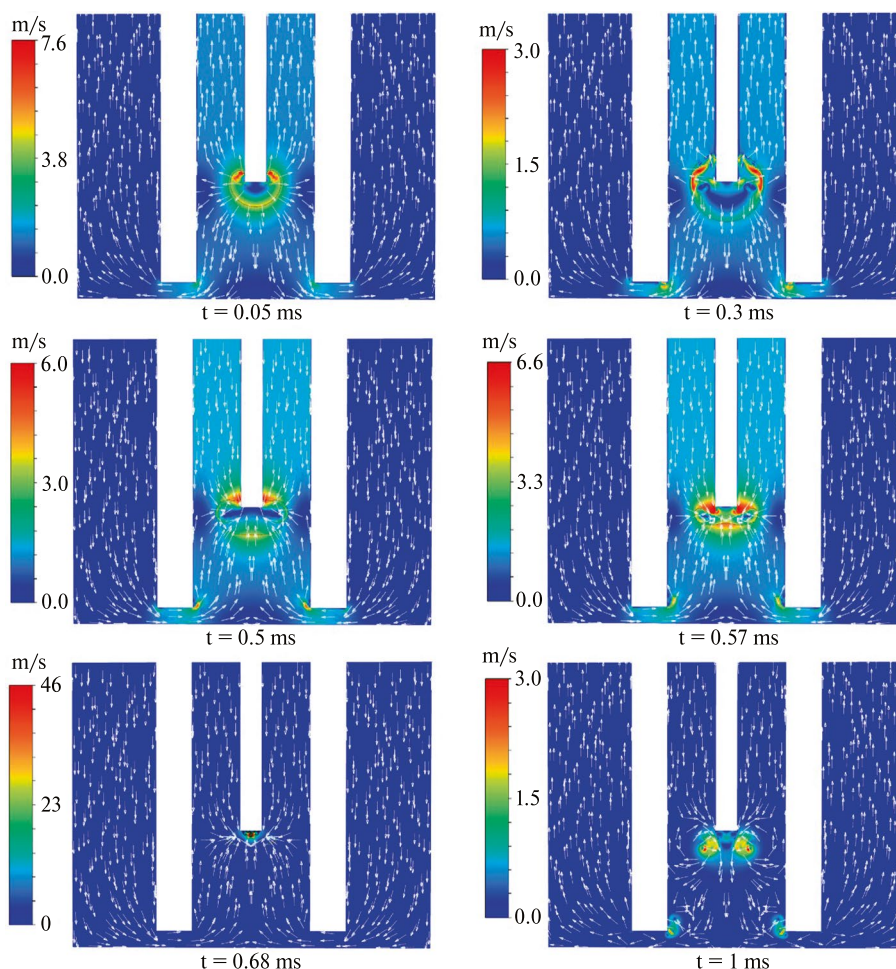


Рис. 4. Динамика паровой фазы кавитационного пузырька и потоков жидкости

возникает в результате падения давления в жидкости над дном кюветы ниже атмосферного. Максимальный прогиб (l) составляет 0.6 мм и достигается за $1.1 \cdot 10^{-4}$ с (t), следовательно, скорость движения листа вверх ($v = l/t$) ~ 5.5 м/с. Тогда перепад давления ($P = \rho v^2/2$) будет около 0.15 атм, что приведёт к возникновению струйного течения при схлопывании пузырька в жидкости.

Ограниченные возможности эксперимента не позволили воспроизвести все тонкости эффекта, поэтому было проведено его численное моделирование с использованием пакета Ansys Fluent 2021 и метода “Volume of Fluid”, в котором рассматривается двухфазная среда “вода–пар”. На рисунке 4 отражены результаты численного моделирования роста и схлопывания парового пузырька в окрестности кончика оптоволокну. При $t = 0.05$ и 0.3 мс наблюдается рост парового пузырька, в процессе которого формируются потоки, выталкивающие жидкость из трубки вверх и вниз. Следующие три кадра (0.5, 0.57 и 0.68 мс) охватывают период схлопывания парового пузырька. В данном случае картина меняется на противоположную — потоки воды в трубке устремляются к пузырьку. Пузырёк начинает втягивать жидкость в трубку вплоть до момента коллапса ($t = 0.68$ мс), когда он достигает минимальных размеров. В результате образуются струи, одна из которых (аксиальная) устремляется снизу к торцу оптоволокну, а другая (радиальная) — сверху к центру пузырька [14, 15]. В момент коллапса аксиальная струя сталкивается с торцом оптоволокну, что приводит к перестройке направления движения потоков жидкости с формированием тороидальных вихрей ($t = 1$ мс).

Лазерная кавитация в медицине. Если патологический очаг представляет собой трубчатую или кистозную структуру, то для его ликвидации достаточно уничтожить его внутренний слой. К таким патологиям относятся различные сосудистые аномалии, киста Бейкера, гигромы, костные кисты, пилонидальная киста, околоушные свищи, геморрой и др. Горячие затопленные струи, генерируемые при лазерной кавитации, эффективно передают тепло путём вынужденной конвекции и вызывают коагуляцию внутреннего слоя патологических структур. За ходом процесса наблюдают с помощью ультразвукового исследования (УЗИ) в режиме реального времени. Кумулятивные струи хорошо видны за счёт расположенных в них эхогенных¹ микропузырьков. Более эхогенным становится и сам патологический очаг за счёт уплотнения тканей при их коагуляции. Исключение составляют костные кисты, в этом случае ультразвуковой контроль становится невозможным и процесс лазер-индуцированного кипения отслеживается по второй игле, заведённой в кисту. Появление парогазовых пузырьков из контрольной иглы служит сигналом к окончанию прогрева кисты.

¹ Эхогенность — это способность тканей различных органов отражать ультразвуковую волну.

На рисунке 5 изображена венозная мальформация правой стопы подростка 16 лет. Когда пациенту было 3 года, была предпринята попытка иссечения образования, однако положительный эффект достигнут не был. Образование увеличилось, и ребёнка стали беспокоить боли в стопе при нагрузке. Амбулаторно под масочным севорановым наркозом была проведена внутритканевая лазерная коагуляция очага мальформации объёмом 18 см³ под контролем УЗИ в режиме реального времени с использованием непрерывного двойного излучения 1.55+1.94 мкм общей мощностью 4 Вт в течение 117 с. Оптическое кварц-кварцевое волокно диаметром 0.4 мм вводили с медиальной стороны от очага мальформации через здоровые ткани посредством контактной лазерной перфорации мягких тканей. Лазерная перфорация здоровых тканей голым оптическим волокном на пути к очагу мальформации и коагуляция этого канала при извлечении волокна позволяют избежать кровотечения из очага. Коагуляцию всего очага проводили путём веерного продвижения оптического волокна на разных эшелонах, чтобы весь очаг закрылся гиперэхогенным облачком, сформированным парогазовыми пузырьками и коагулированной тканью.



Рис. 5. Внешний вид венозной мальформации правой стопы пациента 16 лет

На рисунке 6 представлены эхограмма венозной мальформации стопы в исходном состоянии и фрагмент эхограммы во время внутритканевой лазерной термотерапии, на котором визуализируется светлое гиперэхогенное оптическое волокно и множественные эхогенные парогазовые пузырьки.

На рисунке 7 мы видим стопу после завершения лазерного воздействия. Сморщенная кожа объясняется значительным уменьшением объёма мальформации. Изначально тёмное поле венозной мальформации на эхограмме стало светлым, то есть эхогенным. За 9 лет последующего наблюдения пациент не выказывал жалоб, и повторной лазерной коагуляции не потребовалось.

Использование в лечении пациентов с венозной и артериовенозной мальформацией внутритканевой лазерной термотерапии коротковолновым (1.55 и 1.94 мкм) излучением существенно повысило эффективность терапии по сравнению с излучением 0.97 мкм. Более чем в 5 раз снизилось

количество пациентов, которым для получения хорошего клинического результата понадобились повторные сеансы [16]. Такой результат объясняется более эффективной коагуляцией всех трубчатых структур благодаря активному распространению по мальформации горячих кумулятивных струй, генерируемых на торце оптического волокна за счёт лазерной кавитации.



Рис. 6. Эхограмма исходной венозной мальформации правой стопы (вверху) и во время внутритканевой лазерной термотерапии (внизу)



Рис. 7. Внешний вид стопы после внутритканевой лазерной коагуляции и фрагмент эхограммы патологического участка

Среди костных кист труднее всего поддаются лечению аневризмальные кисты. Приведём пример успешной лазерной термотерапии аневризмальной кисты верхней трети левой малоберцовой кости у девочки 10 лет коротковолновым инфракрасным излучением (1.55 мкм). Ранее безуспешно проводилась лазерная внутрикистозная термотерапия излучением 0.97 мкм (рис. 8).

Торцевое оптическое волокно под наркозом заводи́ли в кисту со стороны малоберцового нерва, чтобы тепловой поток был направлен в безопасную медиальную сторону от нерва. Через два года наблюдается полная нормализация структуры левой малоберцовой кости, то есть выздоровление. На коже передней поверхности голени остался небольшой атрофический рубец из-за ожога от основного потока кумулятивных горячих струй, генерируемых на торце оптического волокна (рис. 9).

Процесс лазерной кавитации острых и хронических инфицированных ран был разработан на основе эффекта инверсионного движения жидкости, возникающего при кавитации на лазерном нагревательном элементе в трубке [14, 15]. Аналогами этого способа были методы лазерактивированной ирригации в стоматологии [17]. Было найдено простое решение: сделать трубку из обрезанного колпачка иглы для внутривенных инъекций с постоянным подведением ирриганта с помощью системы для инфузий таким образом, чтобы торец оптического волокна постоянно находился в столбе жидкости высотой около 10 мм. На рисунке 10 приведён пример использования лазерной кавитации в трубке для лечения раны у ребёнка 12 лет. Ранее было проведено иссечение обширного меланоцитарного невуса передней поверхности правой голени, которое осложнилось некрозом кожного лоскута. После некрэктомии образовалась инфицированная рана площадью 54 см².

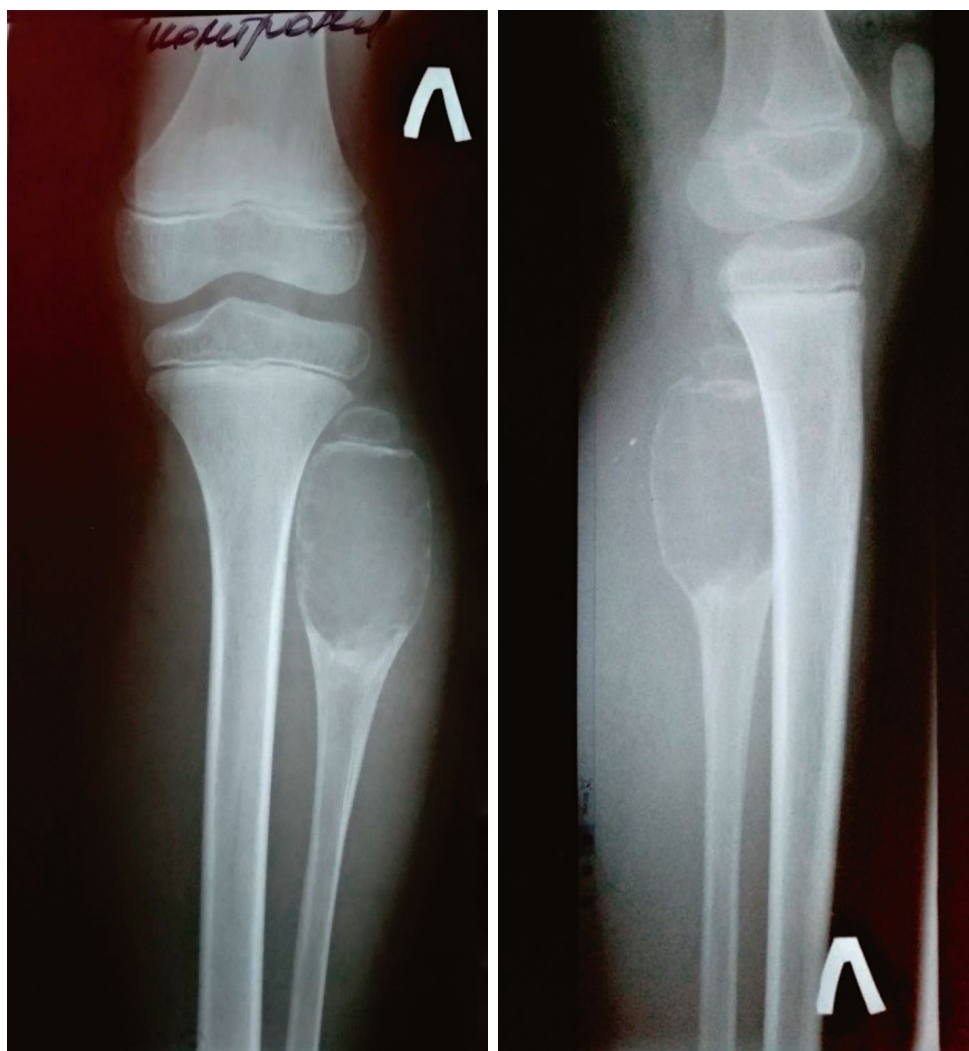


Рис. 8. Рентгенограммы ребёнка 10 лет с аневризмальной кистой проксимальной части левой малоберцовой кости



б



Рис. 9. Рентгенограмма костей левой голени (а) и её внешний вид через два года после лазерной терапии (б)



б



Рис. 10. Некроз кожного лоскута на передней поверхности правой голени ребёнка 12 лет после иссечения обширного меланоцитарного невуса (а) и рана на 6-е сутки после некрэтомии (б)

Результат бактериологического исследования раны показал наличие *Staphylococcus epidermidis* в концентрации 10^5 КОЕ/мл. Лазерная кавитация раны выполнена с помощью устройства с излучением 1.91 мкм мощностью 3 Вт в непрерывном режиме с экспозицией 4 с на каждый участок раны площадью 0.28 см^2 , соответствующий внутреннему диаметру рабочей части устройства. Трубку размещали в 1 мм от поверхности раны. Столб ирриганта в трубке, постоянно вытекающего на рану в образованное щелевидное пространство, поддерживали с помощью инфузионной системы, пополняющей его со скоростью 60 капель в минуту. Общее время каждого сеанса лазер-активированной ирригации раны — 13 мин. В качестве ирриганта использовался 0.05%-ный водный раствор хлоргексидина биглюконата. Всего было проведено 9 ежедневных сеансов лазер-активированной ирригации с перерывом в выходные дни. Рана очистилась, покрылась сочной грануляционной тканью и на

14-е сутки после некрэктомии была успешно закрыта свободным перфорированным дерматомным лоскутом (рис. 11).

У женщины 77 лет гнилостно-некротическая трофическая язва (хроническая рана, С6 по классификации СЕАР²) левой голени образовалась на фоне венозной болезни нижних конечностей, хронической венозной недостаточности и хронического посттромбофлебического синдрома. При поступлении пациентки в стационар была проведена некрэктомия, после которой площадь раны составила 72 см². Бактериологическое исследование выявило рост *Staphylococcus aureus* (10⁷ КОЕ/мл), *Enterobacter aerogenes* (10⁷ КОЕ/мл) и *Pseudomonas stutzeri* (10⁷ КОЕ/мл). Лазерная кавитация раны выполнена в непрерывном режиме с помощью устройства с излучением 1.91 мкм мощностью 8 Вт с экспозицией 6 с на каждый участок раны площадью 0.28 см², соответствующий внутреннему диаметру рабочей части устройства. Общее время каждого сеанса составило 25 мин. В качестве ирриганта использовали 0.9%-ный водный раствор хлорида натрия. Всего проведено 10 ежедневных сеансов лазерной кавитации раны с перерывом в выходные дни. Рана очистилась и покрылась сочной грануляционной тканью. Через три недели после некрэктомии успешно выполнена кожная пластика свободными дерматомными лоскутами, после чего язва полностью зажила (рис. 12).

Лазерная кавитация в трубке показала высокую эффективность при лечении острых и хронических ран у бойцов СВО, которые получили огнестрельные ранения, осложнённые свищевыми формами остеомиелита. На рисунке 13 показана схема лечения свищевой формы остеомиелита, когда физиологический раствор (водный раствор 0.9% NaCl) вводится непосредственно в рану и трубку [15].

В заключение отметим, что для широкого внедрения описанного метода в клиническую практику и улучшения результатов лечения целого ряда заболеваний требуется дальнейшее изучение механизмов воздействия лазер-индуцированной кавитации на биологические ткани. Предварительные экспериментальные исследования показали, что лазер-индуцированная кавитация не обладает прямым бактерицидным действием, а процесс ускорения очищения раны и стимуляции репаративной регенерации, по-видимому, более сложен. Кроме того, необходима разработка медицинских технологий, оборудования и устройств для осуществления лечения на основе лазер-индуцированной кавитации.

² СЕАР — это международная классификация хронических заболеваний вен. Аббревиатура состоит из первых букв названий разделов классификации: С — клинический класс заболевания; Е — этиология заболевания; А — его локализация; Р — тип расстройства.



Рис. 11. Рана спустя 14 суток после некрэктомии (а), после 9-ти сеансов лазерной кавитации в день пластики свободным дерматомным перфорированным кожным лоскутом (б) и на 6-е сутки после кожной пластики (в)



Рис. 12. Язва левой голени пациентки возрастом 77 лет в момент поступления (а), через 20 дней и после 14 сеансов лазерной кавитации (б), с нанесёнными дерматомными лоскутами в день кожной пластики (в) и спустя 5 месяцев после выписки из стационара (г)

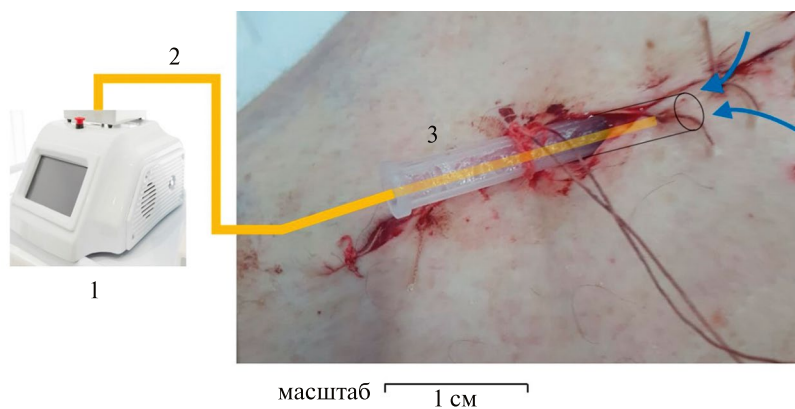


Рис. 13. Очистка гнойной раны с использованием лазерной кавитации в трубке, помещённой в заполненную физиологическим раствором полость
1 – медицинский лазер; 2 – оптоволокно; 3 – трубка с вставленным оптоволоком

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИПМ ДВО РАН № 075-00459-25-00 и ТОИ ДВО РАН № АААА-А20-120031890011-8.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sinibaldi G., Occhicone A., Alves Pereira F. et al.* Laser induced cavitation: Plasma generation and breakdown shockwave // *Phys. Fluids*. 2019, vol. 31 (10), 103302.
2. *Koch M., Rosselló J.M., Lechner C. et al.* Dynamics of a Laser-Induced Bubble above the Flat Top of a Solid Cylinder – Mushroom-Shaped Bubbles and the Fast Jet // *Fluids*. 2022, vol. 7 (1), 2.
3. *Ohl C.D., Arora M., Dijkink R. et al.* Surface cleaning from laser-induced cavitation bubbles // *Applied physics letters*. 2006, vol. 89, 074102.
4. *Dular M., Požar T., Zevnik J., Petkovšek R.* High speed observation of damage created by a collapse of a single cavitation bubble // *Wear*. 2019, vol. 418–419, pp. 13–23.
5. *Hu J., Dirie N.I., Yang J. et al.* Percutaneous Uteroscopy Laser Unroofing – A Minimally Invasive Approach for Renal Cyst Treatment // *Sci. Rep.* 2017, vol. 7, 14445.
6. *Dowlathshahi K., Francescatti D.S., Bloom K.J.* Laser Therapy for Small Breast Cancers // *Am. J. Surg.* 2002, vol. 184, pp. 359–363.
7. *Tontini G.E., Neumann H., Pastorelli L. et al.* Thulium Laser in Interventional Endoscopy: Animal and Human Studies // *Endoscopy*. 2017, vol. 49, pp. 365–370.
8. *Беликов А.В.* Опотермические волоконные конвертеры для лазерной медицины. СПб: Университет ИТМО, 2020.
Belikov A.V. Optothermal fiber converters for laser medicine. St. Petersburg: ITMO University, 2020. (In Russ.)
9. *Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N.* Laser-induced hydrodynamics in water and biotissues nearby optical fiber tip // *INTECH Open Access Publisher*. 2011, pp. 95–118. DOI: 10.13140/2.1.4838.9122.
10. *Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N.* Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues. 1. Generation of bubbles in liquid // *Laser Physics*. 2010, vol. 20, no. 7, pp. 1641–1646.
11. *Kulik A.V., Mokrin S.N., Kraevskii A.M. et al.* Features of dynamics of a jet flow generated on a laser heater by surface boiling of liquid // *Technical Physics Letters*. 2022, vol. 48, no. 1, pp. 60–63.
12. *Mokrin S.N., Tereshko D.A., Kulik A.V. et al.* Selective Laser Heating of Closed Cavity Shells Filled with Liquid // *Doklady Physics*. 2022, vol. 67, no. 12, pp. 491–494.
13. *Mokrin S.N., Tereshko D.A., Kulik A.V. et al.* Physical mechanisms of laser thermotherapy of cysts // *Heat Transfer Research*. 2023, vol. 54 (4), pp. 11–24.
14. *Чудновский В.М., Гузев М.А., Дац Е.П., Кулик А.В.* Эффект ускоренного всасывания жидкости в трубке при лазерной кавитации на лазерном нагревательном элементе // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2023. Т. 513. С. 41–47.
Chudnovskii V.M., Guzev M.A., Dats E.P., Kulik A.V. The effect of accelerated absorption of liquid in a tube during laser cavitation on a laser heating element // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences*. 2023, vol. 513, pp. 41–47. (In Russ.)
15. *Гузев М.А., Василевский Ю.В., Дац Е.П. и др.* Лазерная кавитация в трубке, погружённой в ограниченный объём, заполненный жидкостью // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2024. Т. 519. С. 19–25.
Guzev M.A., Vassilevski Yu.V., Dats E.P. et al. Laser cavitation in a tube immersed in a confined volume filled with liquid // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences*. 2023, vol. 519, pp. 19–25. (In Russ.)
16. *Abushkin I.A., Privalov V.A., Lappa A.V., Minaev V.P.* Fiber 1.56–1.9 μm lasers in treatment of vascular malformations in children and adults *Progress in Biomedical Optics and Imaging* // *Proceedings of SPIE*. 2013, vol. 8565, 85650V.
17. *Meire M., De Moor R.J.G.* Principle and antimicrobial efficacy of laser-activated irrigation: A narrative review // *International Endodontic Journal*. 2024, no. 7 (57), pp. 841–860.

APPLICATION OF CAVITATION ON A LASER HEATING ELEMENT IN SURGERY

M.A. Guzev^{a,*}, V.M. Chudnovskii^{b,}, I.A. Abushkin^{c,***}**

*^aInstitute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia*

*^bV.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia*

^cSouth Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia

**E-mail: guzev@iam.dvo.ru*

***E-mail: vm53@mail.ru*

****E-mail: ivanabushkin@mail.ru*

The article discusses the phenomenon of laser cavitation initiated at the tip of an optical fiber immersed in a liquid under the action of continuous laser radiation. The properties of flooded cumulative jets arising from the collapse of cavitation bubbles are investigated. It is shown that in free space, jets transfer heat through a liquid, and in the case of cavitation inside a tube filled with liquid, they lead to an inversion motion of the liquid. The practical use of the identified effects in medicine allows for effective surgical treatment of vascular diseases, cysts, acute and chronic infected wounds.

Keywords: laser, cavitation, numerical simulation, acute and chronic infected wounds, coagulation of cysts and blood vessels.

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ И ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ КЛИНИЦИСТА

© 2025 г. Ю.В. Василевский^{a,b,*}

^aИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

^bПервый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова Минздрава России, Москва, Россия

*E-mail: yuri.vassilevski@gmail.com

Поступила в редакцию 07.03.2025 г.

После доработки 10.03.2025 г.

Принята к публикации 22.03.2025 г.

В статье, подготовленной на основе научного доклада автора на заседании президиума РАН, представлены итоги десятилетнего сотрудничества математиков и клиницистов в ходе междисциплинарных проектов, а также результаты, полученные в рамках недавно завершённого проекта РНФ “Новые математические методы и технологии в актуальных задачах геофизики и биомеханики”. Полученные результаты помогут усовершенствовать диагностику ишемической болезни сердца, гиперпрессии надколенника и шейно-плечевого синдрома, а также в планировании операций по реконструкции аортального клапана и коррекции врождённого порока сердца. На базе накопленного опыта в решении междисциплинарных задач предлагаются пути повышения эффективности взаимодействия клиницистов и математиков.

Ключевые слова: математическое моделирование, персонализированная модель, система поддержки принятия врачебных решений.

DOI: 10.31857/S0869587325080028, **EDN:** DSXCZI

Персонализированные математические модели с каждым годом становятся всё более востребованными в клинической практике [1, 2]. В настоящей работе обобщён десятилетний опыт взаимодействия математиков и клиницистов в рамках междисциплинарных проектов, а также представлен краткий обзор результатов, полученных в рамках проекта Российского научного фонда № 21-71-30023 “Новые математические методы и технологии в актуальных зада-

чах геофизики и биомеханики” [3, 4]. Эти результаты касаются четырёх социально значимых заболеваний, для которых повышение качества диагностики и/или лечения существенно снижает смертность или потерю трудоспособности населения.

Ишемическая болезнь сердца (ИБС). Заболевания сердечно-сосудистой системы — главная причина смертности в мире, причём доля летальных исходов от них в России в 2023 г. составила 46.2%, а смертность от ИБС — 24.7% от общего количества смертей [5]. Как показывает опыт развитых стран, массовая диагностика ишемической болезни сердца и своевременно назначенное лечение позволяют значительно уменьшить этот показатель, что создаёт огромный экономический эффект благодаря продлению периода трудоспособности.

Порок аортального клапана. Из-за неуклонного роста продолжительности жизни патология сердечных клапанов, которую в настоящее время называют сердечной эпидемией, становится частой причиной летального исхода. Недостаточность аортального клапана ответственна примерно за поло-



ВАСИЛЕВСКИЙ Юрий Викторович — член-корреспондент РАН, заместитель директора ИВМ РАН по научной работе, заведующий кафедрой высшей математики, механики и математического моделирования Сеченовского университета.

вину смертей в структуре смертности от клапанных патологий. Недавнее исследование показало, что в Европе и США насчитывается 4.9 и 2.7 млн человек с аортальным стенозом соответственно [6], а пятилетняя выживаемость неоперированных пациентов с патологией даже средней степени тяжести составляет чуть более 50% [7].

Врождённый порок сердца. Ежегодно в России рождается более 20 тыс. детей с врождёнными пороками сердца. Около половины из них требуют операций гемодинамической коррекции, а доля осложнений, в том числе летальных, во время таких операций достигает 15% [8].

Патологии опорно-двигательного аппарата. Более 22% людей испытывают боли в пателлофemorальном суставе, причём среди подростков это наблюдается в 30% случаев [9]. Порядка 10% пациентов с патологиями коленного сустава имеют синдром латеральной гиперпрессии надколенника, когда при движении на него оказываются чрезмерные нагрузки, что причиняет человеку сильные боли и ограничивает его подвижность [10]. По данным Международной ассоциации по изучению боли (IASP), от 20 до 50% людей страдают болями в области шеи и плечевых суставов [11, 12], а шейно-плечевой синдром является одной из основных причин снижения трудоспособности.

Подробнее рассмотрим поставленные клиницистами задачи, направленные на борьбу с перечисленными выше заболеваниями, а также полученные математиками результаты.

Неинвазивные методы диагностики ишемической болезни сердца. Задача, связанная с диагностикой ИБС, решалась совместно с клиницистами Сеченовского университета. ИБС может быть вызвана сужениями (стенозами) коронарных артерий и/или нарушением перфузии миокарда, вызванным поражениями микрососудистого русла. Протокол лечения данного заболевания зависит от его диагностики. Несмотря на то, что стенозы хорошо видны на медицинских (ангиографических или томографических) изображениях коронарных сосудов при введении в кровь контрастного вещества, около 10 лет назад было клинически доказано, что гемодинамическая значимость стеноза не определяется его геометрическими характеристиками, особенно в случае умеренного стеноза. Более корректную информацию о его роли дают гемодинамические индексы [13, 14].

Индекс FFR/ФРК (fractional flow reserve – фракционный резерв кровотока) обладает наибольшими чувствительностью и специфичностью и поэтому считается золотым стандартом диагностики стенозов, на основе которого принимается решение об эндоваскулярном (внутрисосудистом) восстановлении просвета. Измерение этого индекса осуществляется после введения сосудорасширяющих препаратов внутрисосудистым датчиком давления, который за-

водится в коронарную артерию с помощью специального катетера. Эта процедура является инвазивной и дорогостоящей и может вызывать осложнения, поэтому возникла потребность в технологиях неинвазивной оценки ФРК, которые должны базироваться на персонализированных вычислительных моделях коронарного кровотока. За последние 10 лет появилось несколько таких технологий. Все они используют данные контрастированной компьютерной томографии (КТ), поэтому имеют общее обозначение FFR_СТ/ФРК_КТ. Например, технология “Виртуальный ФРК” была разработана в 2015–2018 гг. сотрудниками Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН), Московского физико-технического института и Сеченовского университета на основе персонализированной сетевой модели коронарного кровотока [1, 2] в рамках гранта РНФ № 14-31-00024 на создание лаборатории мирового уровня. В 2021–2022 гг. технология была доработана в НЦМУ “Цифровой биодизайн и персонализированное здравоохранение” до уровня системы поддержки принятия врачебных решений – СППВР (рис. 1) [15]. Клинические испытания СППВР завершаются в 2025 г., после чего система получит регистрационное удостоверение Росздравнадзора, позволяющее внедрить её в практику.

Клиническое ограничение использования ФРК_КТ как диагностического метода возникает в случае пациентов, у которых нарушена перфузия миокарда, поскольку оценка гемодинамической значимости стеноза может быть некорректной. Для диагностики таких пациентов применяется перфузионная компьютерная томография (ПКТ), которая виртуально разбивает миокард на 16 стандартных зон и в каждой из них автоматически оценивает перфузионный индекс TPR (рис. 2). Качество изображений, как правило, не позволяет выделить для каждой зоны снабжающий её сосуд. В связи с этим предложен адаптивный алгоритм выделения перфузионных зон (по первичным данным ПКТ) в зависимости от структуры видимых на контрастированных КТ-снимках коронарных артерий пациента и качества КТ-данных. Это позволяет одновременно регистрировать и учитывать в математической модели изображения разной модальности (ПКТ- и КТ-ангиография) путём сопоставления патологических поражений в снабжающих их коронарных артериях. В результате разработаны алгоритм зональной сегментации перфузионных областей левого желудочка, соответствующих видимым на контрастированных КТ-снимках концевым коронарным артериям, и алгоритм расчёта перфузионного индекса TPR для каждой из зон [16].

Таким образом, стало возможно автоматизированное построение редуцированной сетевой модели коронарного кровотока, учитывающей регистрируемые зоны перфузии миокарда с модифицирован-

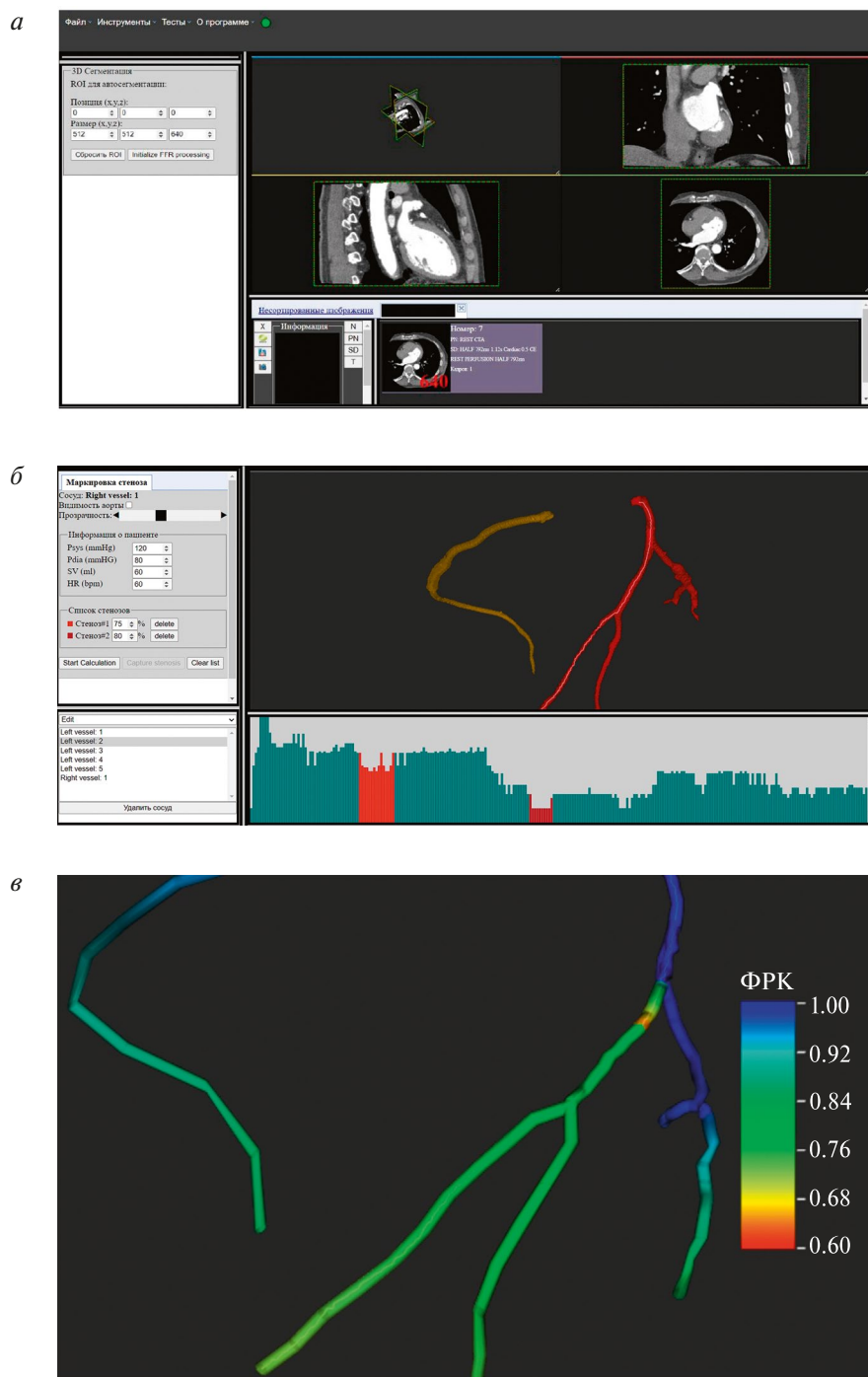


Рис. 1. Графический интерфейс СППВР “Виртуальный ФРК” для работы с КТ-изображениями (*a*), характеристики сосудистого русла (*б*), расчётные значения индекса ФРК (*в*)

ными граничными условиями на терминальных артериях (в зависимости от ПКТ-данных пациента) путём назначения терминальных сопротивлений (см. рис. 2) [17]. Сетевая модель учитывает данные ПКТ при расчёте различных режимов коронарного кровотока: в норме или при введении вазодилататора, вызывающего гиперемия. Про-

ведён анализ воспроизводимости, чувствительности и специфичности ряда гемодинамических индексов, рассчитанных с помощью разработанной модели кровотока. Более того, модель позволила ввести новый ПКТ-индекс — изолированный ФРК (ФРК_изо), оценивающий гемодинамическую значимость стеноза и рассчитываемый как

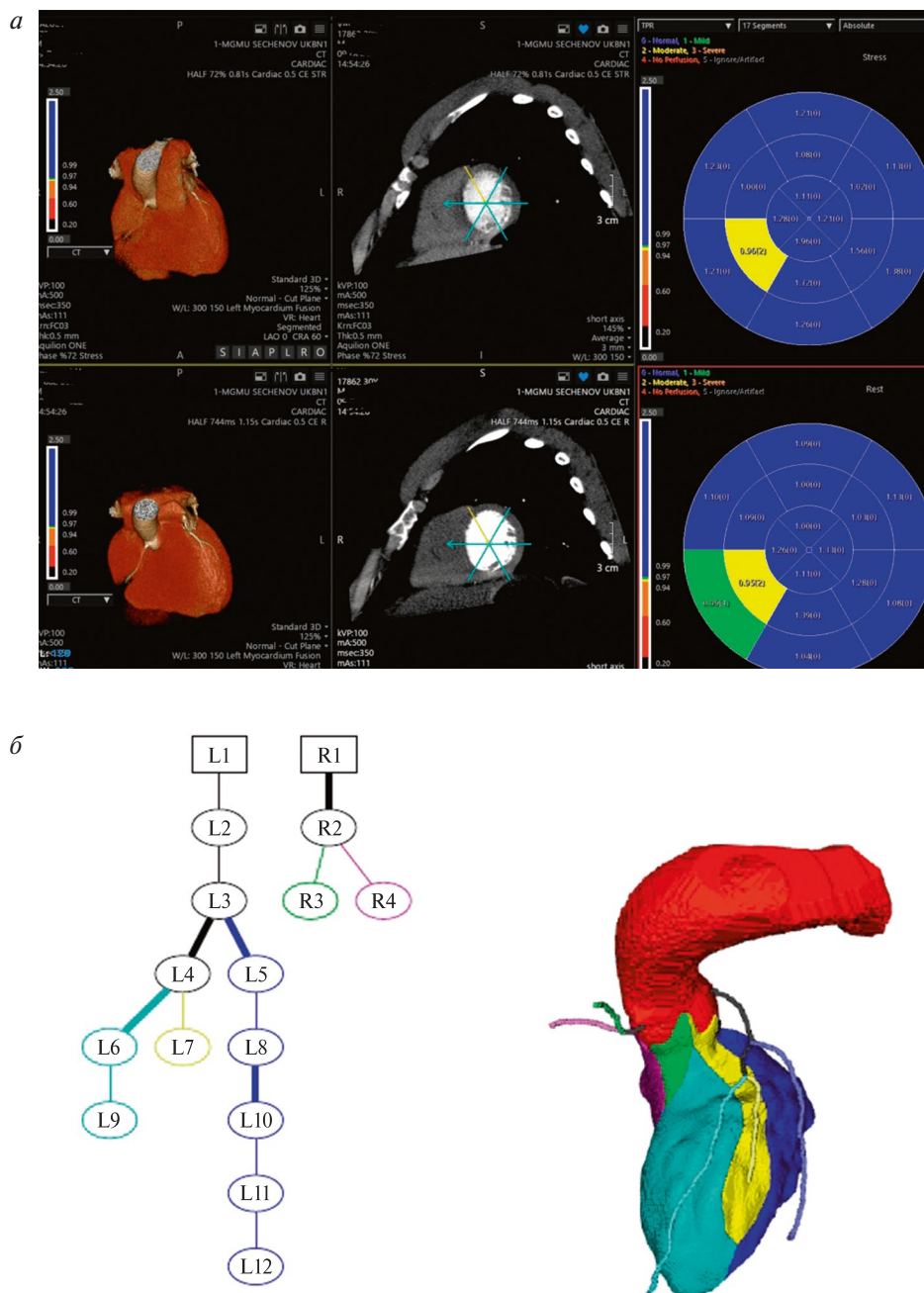


Рис. 2. Графический интерфейс исследования ПКТ со стандартным разбиением миокарда на 16 зон (а) и сеть сосудов в редуцированной сетевой модели кровотока и перфузионные зоны видимых на КТ коронарных артерий (б)

индекс ФРК при отсутствии других стенозов и здоровой перфузии. Преимущество нового индекса — оценка значимости стеноза без влияния сторонних факторов, поскольку затруднённая перфузия и другие стенозы искажают значение ФРК.

На основе ПКТ-индекса ФРК_{изо} разрабатывается новая СППВР неинвазивной диагностики ИБС, которая позволяет учитывать индекс ФРК, вычисленный с помощью персонализированной математической модели, а также расширять диаг-

ноз путём сопоставления измеренного и вычисленного ФРК. Установлено, что если значение вычисленного ФРК_{изо} ниже измеренного ФРК более чем на 4%, то это говорит о наличии поражений микрососудистого русла ниже по течению, что требует дополнительного, более дорогостоящего исследования ПКТ. При наличии данных ПКТ производится уточнение зон перфузии для персонализированной оценки поражённых коронарных артерий.

Реконструкция аортального клапана с использованием обработанного аутоперикарда. Задача, связанная с реконструкцией аортального клапана (АК), решалась совместно с клиницистами Сеченовского университета и Российского научного центра хирургии им. академика Б.В. Петровского. У пожилых пациентов створки клапана теряют эластичность, и возникает кальциноз, что приводит к нарушению функции клапана: его недостаточное открытие требует дополнительной работы миокарда из-за повышенного гидродинамического сопротивления, а неполное закрытие приводит к возникновению патологического обратного кровотока (регургитация) в желудочек в диастолу, что в долгосрочной перспективе грозит структурными изменениями его стенок и летальным исходом. Стандартный метод лечения сводится к замене клапана на механический или биологический аналог, для чего нужна постоянная медикаментозная профилактика возможных послеоперационных осложнений. При этом приём антикоагулянтов или иммунодепрессантов имеет свои побочные эффекты. Около 15 лет назад была предложена неоксипидизация по методике С. Озаки — альтернативный подход к реконструкции аортального клапана, подразумевающий вшивание новых створок из обработанного аутоперикарда — сердечной сумки самого пациента [18]. Преимущество этого подхода заключается в том, что он не требует установки искусственного клапана и не приводит к осложнениям, однако подбор размера створок усложняет операцию, увеличивая время искусственного кровообращения у пациента.

Задача проекта РНФ заключалась в формировании элементов будущей системы поддержки принятия врачебных решений для дооперационного подбора (виртуального раскроя) новых створок аортального клапана на основе КТ-изображений пациента. Эти элементы должны обеспечивать: автоматическую сегментацию корня аорты, виртуальное вшивание створок для формирования нового клапана, моделирование его закрытого (диастолического) состояния, оптимизацию размера и формы новых створок по зонам смыкания, взаимодействие с врачом посредством веб-интерфейса.

Автоматическая сегментация корня аорты обеспечивается алгоритмом обработки контрастированных КТ-снимков в фазе диастолы (рис. 3, а) [1], результатом работы которого является поверхностная треугольная сетка корня аорты. Линии крепления створок АК определяются хирургом с помощью нескольких опорных точек на поверхности корня аорты (рис. 3, б).

Алгоритм виртуального тестирования плоских шаблонов новых створок в корне аорты учитывает особенности пришивания во время операции и формирует начальную конфигурацию их расположения [19, 20]. Линии пришивания задаются набором

из нескольких опорных точек на 3D-изображении корня аорты в специально разработанном веб-интерфейсе.

Расчёт диастолического состояния реконструированного аортального клапана пациента обеспечивает численная гиперупругая модель закрытого клапана, которая может учитывать или игнорировать изгибную жёсткость вшиваемых створок, применять различные геометрические подходы для моделирования контактов [20], описывать деформацию створок из любого гиперупругого материала (рис. 3, в). Предложенная математическая модель обладает гибкостью и позволяет реализовать любую гиперупругую модель изотропного/анизотропного тела при инвариантном описании материала [21–23]. В настоящее время в ней используются параметры и вид гиперупругого потенциала для свиного перикарда. Экспериментальное исследование механических свойств человеческого перикарда входит в перечень актуальных задач современной биомеханики. Для валидации модели закрытого состояния АК проведены натурные эксперименты на нескольких свиных клапанах, которые показали хорошее соответствие расчётных и измеренных параметров [24].

Для выбора размера и формы новых створок предложены геометрические критерии оптимальных зон смыкания, основанные на оценке таких коаптационных (смыкательных) характеристик, как длина коаптации, центральная высота коаптации, эффективная высота створки, глубина провисания (биллоунг), эффективная площадь просвета регургитации [20]. Геометрия новых створок может быть задана малым числом параметров, поэтому для оптимизации геометрии служит алгоритм глобального поиска на кривых Гильберта, заполняющих малопараметрическое пространство [25].

Для взаимодействия модели с врачом были разработаны графический интерфейс для полуавтоматического проведения линии пришивания на основе опорных точек, задаваемых хирургом на поверхности корня аорты (см. рис. 3, б), а также сервис-контейнер с веб-приложением для виртуальной раскройки новых створок АК из аутоперикарда (рис. 4, а). Помимо валидации моделей закрытия аортального клапана на свиных сердцах, элементы системы поддержки принятия врачебных решений успешно апробированы во время одной из операций по реконструкции АК: его диастолическое состояние (рис. 4, б) было хорошо предсказано расчётной моделью.

Коррекция сложных врождённых пороков сердца у детей. Задача, связанная с коррекцией врождённых пороков сердца у детей, решалась совместно с клиницистами Национального медицинского исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева. Если у пациента функционально единственным оказывается левый желудочек, правые отделы сердца исключаются из кровообращения

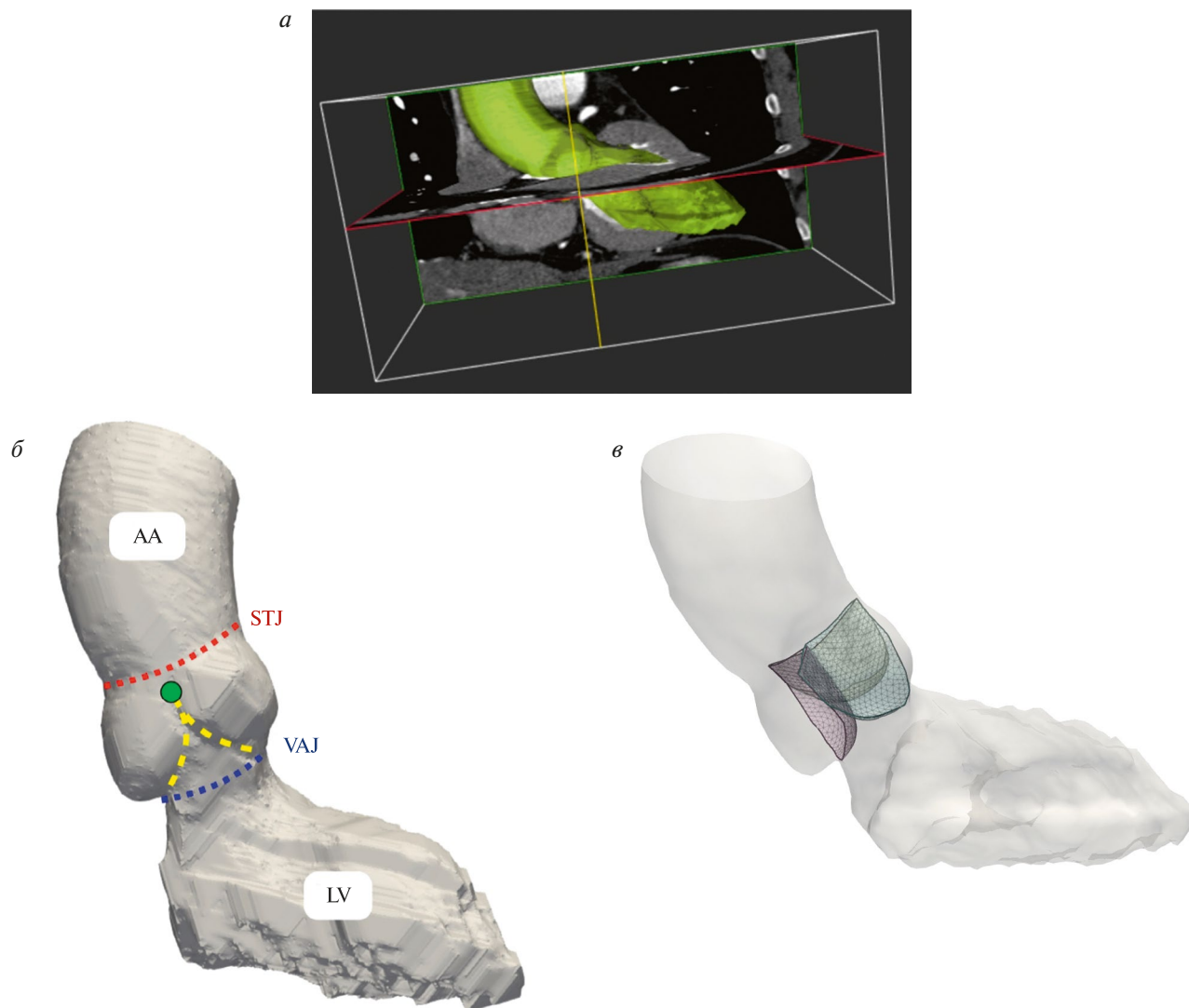


Рис. 3. Контрастированный КТ-снимок корня аорты (а), восстановленные линии пришивания створок АК (б), рассчитанное смыкание створок в закрытом состоянии АК (в).

STJ — синотабулярное соединение; VAJ — вентрикуло-аортальное соединение; LV — левый желудочек; AA — восходящая аорта

путём прямого соединения полых вен и лёгочных артерий. Такая коррекция проводится в несколько этапов, среди которых создание двунаправленного кавапульмонального анастомоза — соустья верхней полых вены и правой лёгочной артерии — для подготовки малого круга кровообращения к дальнейшей операции Фонтена, и сама операция Фонтена, в ходе которой формируется полное кавапульмональное соединение (ПКПС) — крестообразный стык верхней и нижней полых вен, левой и правой лёгочных артерий. Геометрические характеристики ПКПС существенно влияют на распределение крови между левым и правым лёгким и на гемодинамическое сопротивление этого соединения. Существующие протоколы операции демонстрируют большую неопределённость в выборе этих характеристик, что зачастую приводит к неудачным решениям.

Для создания системы поддержки принятия врачебных решений по предоперационному выбору оптимального полного кавапульмонального соединения нужно научиться сегментировать КТ- и МРТ-изображения в окрестности двунаправленного кавапульмонального анастомоза, строить расчётную область возможного ПКПС и персонализированную модель кровотока для прогноза регионального кровотока в заданном соединении после операции Фонтена как в положении лёжа, так и в положении стоя, в том числе при ходьбе, а также находить оптимальную форму полного кавапульмонального соединения. Процедура оптимизации подразумевает частое обращение к модели кровотока при разных формах ПКПС. Для ускорения расчётов предлагается использовать физически информированную нейросеть, заменяющую вычислительно дорогой трёхмер-

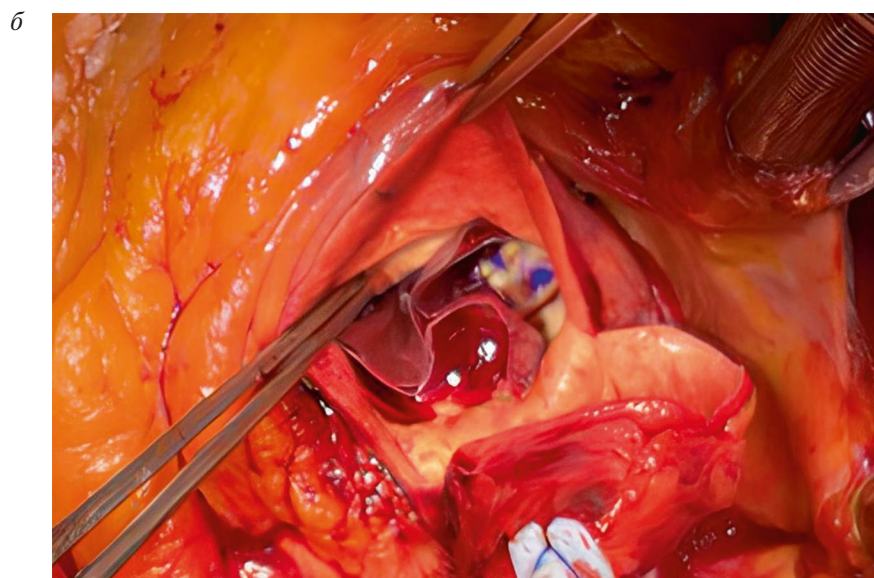


Рис. 4. Веб-приложение для виртуальной раскройки новых створок АК (*a*), реконструированный АК (*б*)

ный расчёт кровотока в полном кавапульмональном соединении. Эти элементы системы поддержки принятия врачебных решений должны быть объединены в рамках веб-приложения, обеспечивающего хирургу графический интерфейс взаимодействия с системой. К настоящему времени разработана методология и реализованы основные этапы вычислительной технологии выбора наилучшей геометрии ПКПС для гемодинамической коррекции сложных пороков сердца с помощью редуцированной модели кровотока.

На первом этапе проводится регистрация таких клинических данных пациента, как УЗИ и КТ/МРТ сосудов, антропометрические измерения, показатели давления и т.д. В частности, был получен метод автоматизированной сегментации КТ/МРТ-данных с выделением лёгочных артерий, полых вен, камер

сердца и генерации расчётных сеток (рис. 5). Анализ достоверности КТ- и МРТ-данных показал, что первые лучше подходят для сегментации, а МРТ-измерения потоков в полых венах и лёгочных артериях слишком грубые, чтобы использовать их в качестве граничных условий для уравнений Навье—Стокса применительно к полному кавапульмональному соединению [26]. Замкнутые сетевые модели кровообращения могут быть персонализированы с помощью достоверных методов, например, ультразвуковых измерений скорости кровотока в доступных для УЗИ сосудах, а также МРТ-измерений потока крови в аорте. Поэтому персонализированная модель кровотока пациента с кровообращением Фонтена должна быть двухмасштабной: граничные условия для трёхмерной модели кровотока в области полного кавапульмонального соединения пре-

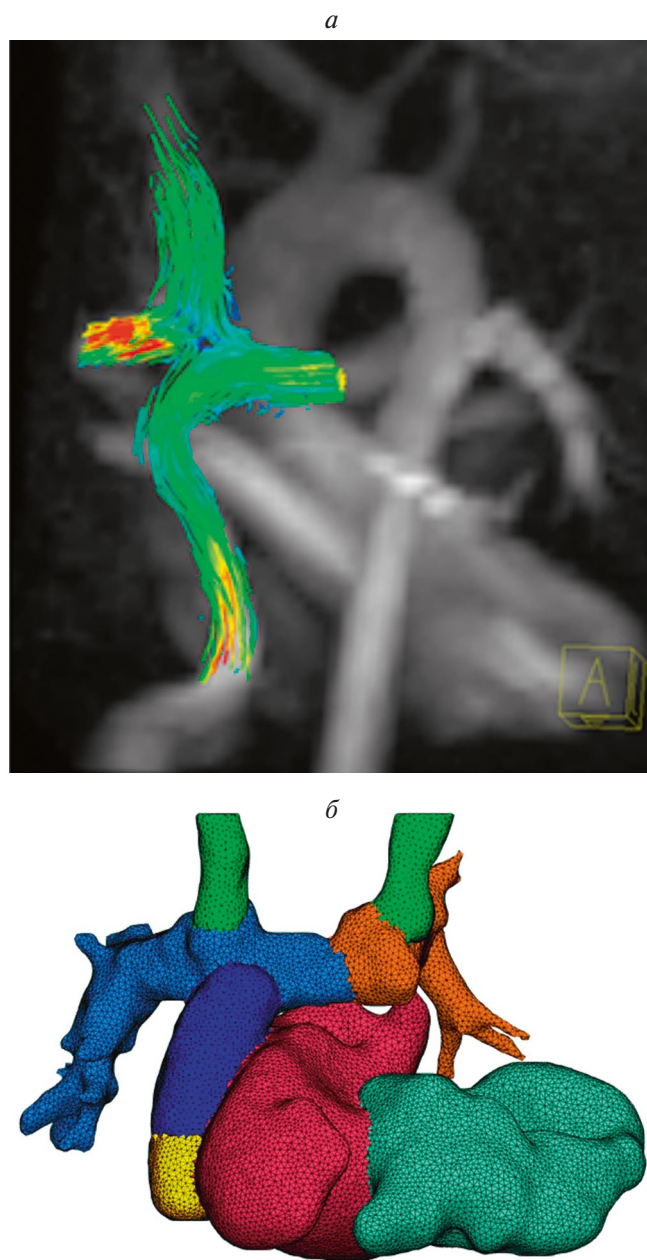


Рис. 5. Линии тока в полном кавапulмональном соединении, согласно 4D FLOW MPT-данным (а), сегментация и расчётная сетка для ПКПС и камер сердца (б)

доставляются глобальной сетевой моделью кровообращения, которая, в свою очередь, использует трёхмерный расчёт для перераспределения потоков и учёта гидродинамического сопротивления этого соединения (рис. 6) [27].

Для ускорения двухмасштабного расчёта разработана и верифицирована редуцированная модель кровотока 1D-PINN, в которой сетевая персонализированная модель глобального кровообращения учитывает сложное течение крови в полном кава-

пульмональном соединении с помощью физически информированной нейронной сети (PINN). На обучение нейронной сети направлен метод построения расчётных сеток в ПКПС различной конфигурации, состоящих из четырёх стыкующихся сосудов. Генератор расчётных сеток надёжно работает при разных диаметрах и углах стыковки сосудов и сдвиге кондуита (продолжение нижней поллой вены) относительно верхней поллой вены. В каждой области решаются 3D-уравнения Навье—Стокса с разными показателями давления на внешних границах, формируя набор данных для обучения. Обученная нейронная сеть может предсказывать потоки крови на границе области полного кавапulмонального соединения в зависимости от её геометрии и граничных давлений [28]. Для интеграции нейронной сети в 1D-модель кровообращения разработан численный алгоритм, обеспечивающий быстрый мультимодельный расчёт персонализированной конфигурации ПКПС с использованием 1D-PINN-модели [29].

Поиск наилучшей геометрии соединения сосудов осуществляется с помощью решения оптимизационной задачи, минимизирующей гидродинамическое сопротивление полного кавапulмонального соединения и диссипацию энергии в нём при анатомических ограничениях на допустимые значения геометрических параметров. На небольшой выборке пациентов удалось показать, что данные критерии хорошо соотносятся с клиническим состоянием больных. Таким образом, разработаны основные элементы системы поддержки принятия врачебных решений по выбору наилучшей геометрии полного кавапulмонального соединения для гемодинамической коррекции сложных пороков сердца. Дальнейшие шаги связаны с созданием графического веб-интерфейса для взаимодействия врача с моделью и интеграцией всех элементов в единую систему.

Диагностика шейно-плечевого синдрома и пластика стабилизирующих структур надколенника. Вопросы планирования операций на коленном суставе и диагностики болей в шейно-плечевом отделе рассматривались совместно с клиницистами Сеченовского университета. Биомеханические модели подсистем опорно-двигательного аппарата создавались на базе открытой исследовательской платформы OpenSim [30], а задачи персонализации таких моделей решались на основе собственных оригинальных алгоритмов. Математические модели, положенные в основу OpenSim, представляют собой уравнения динамики системы многих тел (костей), соединённых специальными шарнирами (суставами), пассивно-упругими связками и активно-пассивно-упругими мышцами с сухожилиями.

Планирование операции по пластике мягкотканых стабилизирующих структур (связок и сухожилий) надколенника нуждается в прогнозе траектории его движения при сгибании коленного сустава, а также в оценке распределения опорной нагрузки

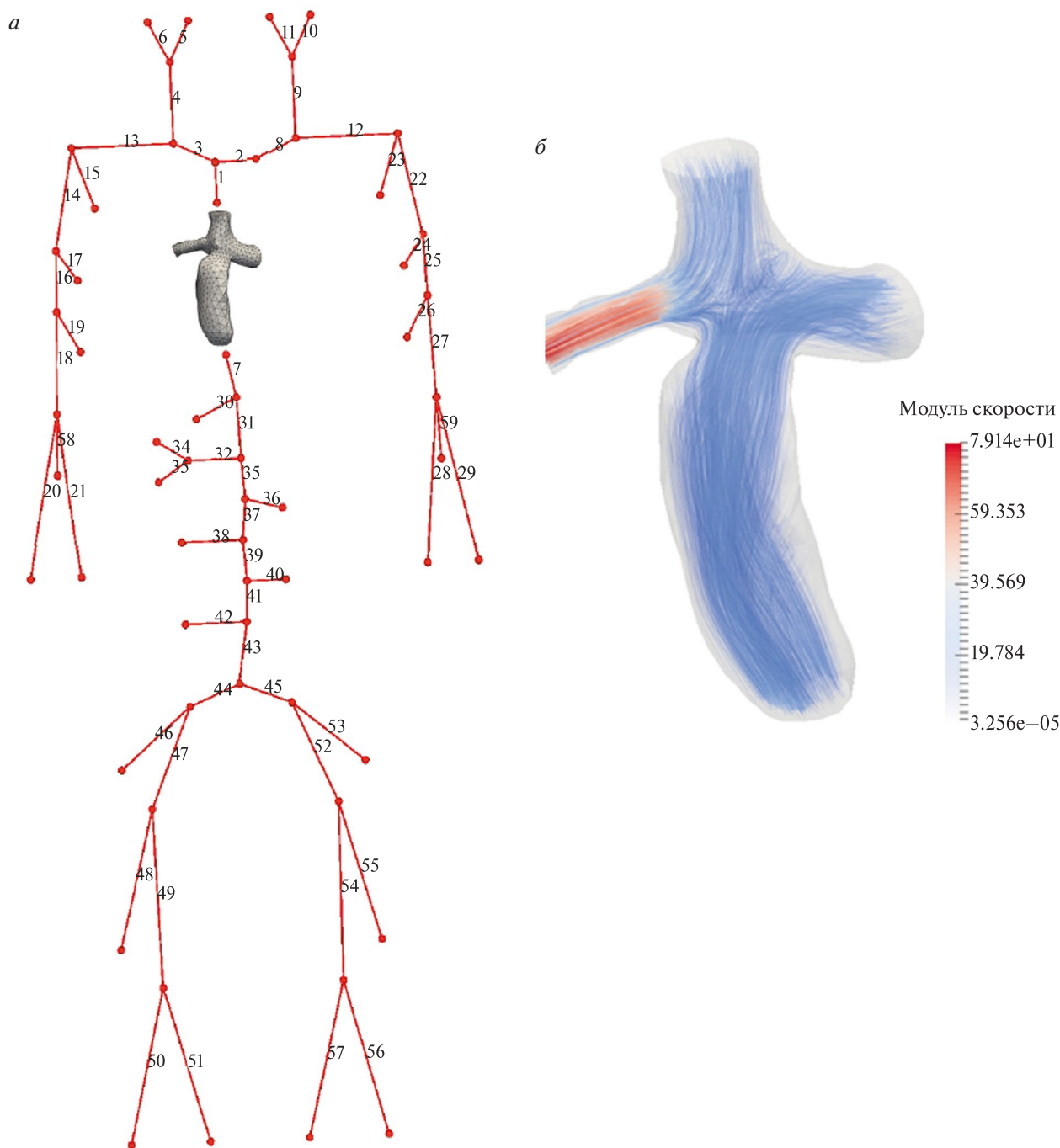


Рис. 6. Сопряжение венозной модели большого круга кровообращения и 3D-модели полного кавапультмонального соединения (а), рассчитанные линии тока крови в 3D-области ПКПС, см/сек (б)

на поверхность надколенника [31]. Была разработана анатомически корректная биомеханическая модель коленного сустава с шестью степенями свободы для движений надколенника, учитывающая контактные поверхности надколенника и стабилизаторы (связки и сухожилия) (рис. 7). Поскольку модель обладает полным функционалом для исследования движения надколенника, стало возможным изучить влияние состояния различных стабилизаторов на его движе-

ние и испытываемые им нагрузки. В частности, впервые удалось детально рассмотреть траектории и нагрузки при различных виртуальных повреждениях связок, стабилизирующих надколенник (рис. 8) [32].

Для персонализации модели коленного сустава, помимо сегментации КТ-изображений костей, необходима информация об анатомических и морфологических ориентирах для связок и сухожилий

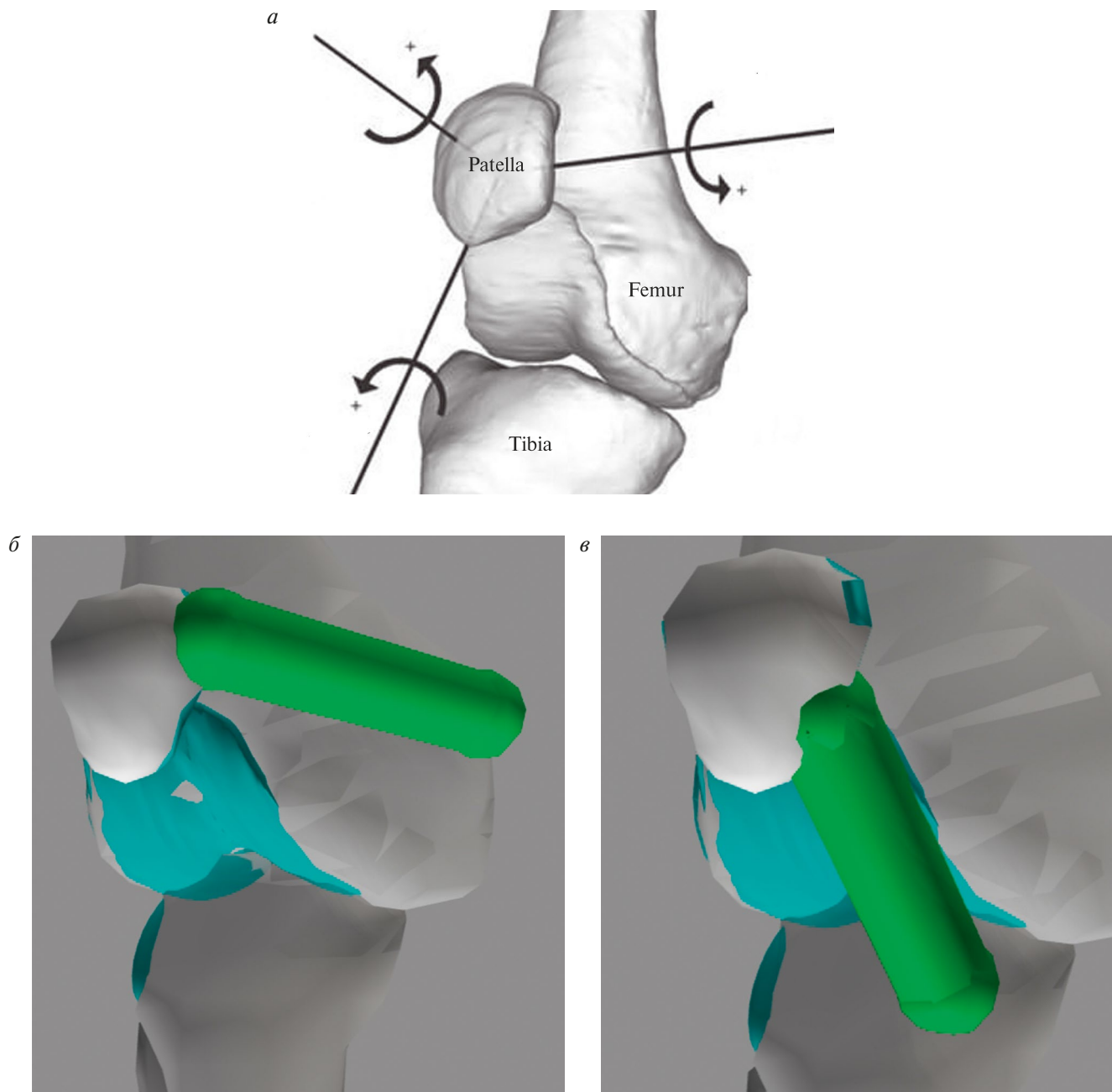


Рис. 7. Возможные направления движения надколенника (*а*) и его стабилизаторы — пателлофemorальная связка MPFL (*б*) и медиальная пателлотибальная связка MPTL (*в*)

коленного сустава [33]. Для большинства стабилизаторов удалось разработать автоматические алгоритмы детектирования точек (зон) их крепления к костям по данным КТ-изображений коленного сустава [34]. Для виртуального крепления оставшихся связок нужна экспертиза клинициста. Создание системы поддержки принятия врачебных решений по планированию пластики мягкотканых стабилизирующих структур коленного сустава потребует интеграции биомеханической модели и алгоритмов сегментации КТ-изображений [33]

в рамках графического веб-интерфейса для интерактивного взаимодействия с врачом.

Для проведения фундаментальных исследований по диагностике шейно-плечевого синдрома получена биомеханическая модель совместного функционирования плечевого и шейного отделов, с помощью которой удалось установить вклад разных мышц в движения головы и плеч. Эта модель объединила существующие модели груднопоясничного отдела позвоночника и грудной клетки, пле-

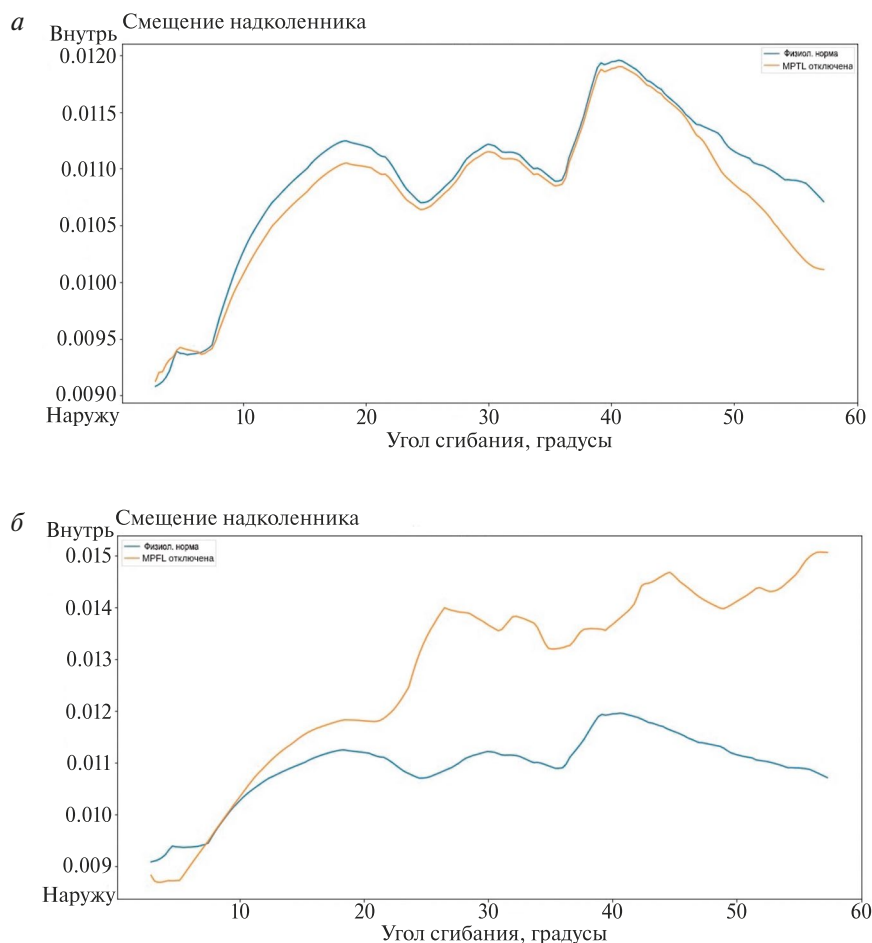


Рис. 8. Латерально-медиальное смещение надколенника (в метрах) во время сгибания колена в норме и при отключении стабилизаторов MPFL (а) и MPFL (б)

ча, головы и шеи и инкорпорировала 23 различные мышцы, участвующие в функционировании шейно-плечевого отдела (рис. 9). Для персонализации модели использовались сведения об анатомических и морфологических ориентирах для связок и сухожилий плечевого сустава и экспериментальные данные о кинематике движений испытуемого. Запись движений головы и плеча осуществлялась с помощью технологии видеозахвата движения. Благодаря этому биомеханическая модель была персонализирована, рассчитаны движения головы и плеча, проведён расчёт силы и активации мышц, количественно оценён вклад мышц шейного и плечевого отделов в обеспечение различных движений при нормальном функционировании шейно-плечевого отдела [35]. Трансформация проведённого исследования в систему поддержки принятия врачебных решений для диагностики шейно-плечевого синдрома сталкивается с трудностями автоматической персонализации биомеханической модели по КТ-изображению и экспериментальным данным о кинематике движений. Несмотря на то, что была подтверждена принципиальная возможность пер-

сонализации модели, автоматизация этого процесса требует значительных дополнительных усилий.

Особенности междисциплинарных исследований с участием клиницистов. Не только решение, но и постановка четырёх вышеизложенных задач были бы невозможны без тесного взаимодействия с клиницистами из различных организаций, которое удалось наладить благодаря заинтересованности наших коллег и удобным правилам финансирования проектов Российского научного фонда. За 10 лет выявлен ряд факторов, препятствующих плодотворному и эффективному сотрудничеству с медиками:

- врачи перегружены нормативами по приёму пациентов, заполнение многочисленных бумаг и поток больных не оставляет им времени на проведение научных изысканий, даже если они считают их перспективными;
- они скептически относятся к задачам, которые не проистекают из их клинической практики, поэтому постановка задачи для междисциплинарного исследования с участием клиницистов — именно их прерогатива;

• вывод даже деперсонализированных данных и/или биоматериалов из медицинского учреждения во внешние организации затруднён из-за ограничений законодательства, что приводит к сложности получения информации для междисциплинарного исследования;

• бюджет медицинских центров, заинтересованных в создании новых технологий, не предусматривает вложения средств в подобные инновации.

Публикации в рейтинговых журналах, выступления на конференциях, получение патента — это

лишь промежуточные этапы на пути воплощения идеи в жизнь. Конечный продукт в сфере биомедицины — медицинское изделие, зарегистрированное в Росздравнадзоре и допущенное к использованию на практике. В нашем случае любая система поддержки принятия врачебных решений считается медицинским изделием, представляющим собой программное обеспечение (ПО), регистрация которого требует проведения тщательных технических и клинических испытаний сторонними организациями, не участвовавшими в его разработке. Эти испыта-

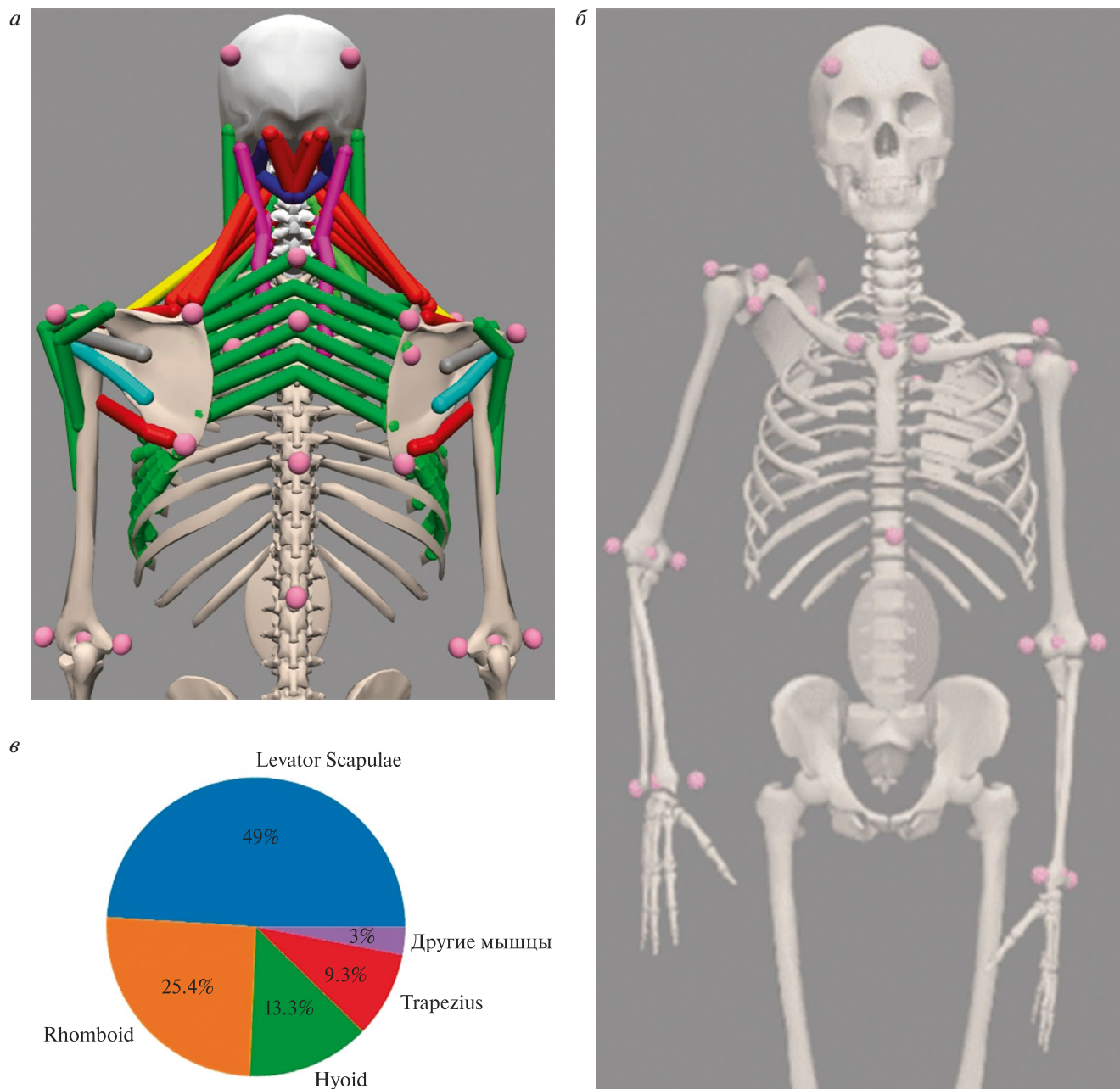


Рис. 9. Некоторые мышцы биомеханической модели совместного функционирования плечевого и шейного отделов (*a*), эксперимент с захватом движений при поднятии плеча (*б*), вклад мышц в поднятие правого плеча (*в*)

ния всегда нуждаются в совершенствовании ПО и повторных циклах. Процесс регистрации готовой системы поддержки принятия врачебных решений занимает до двух лет, поэтому никакой трёхлетний проект разработки новой СППВР не может быть успешно реализован, если на его начальном этапе отсутствовали какие-либо элементы системы. Таким образом, среднесрочное (до трёх лет) финансирование СППВР не может стимулировать новые разработки, а только поддерживает доведение до рынка услуг уже существующих решений.

Системы поддержки принятия врачебных решений, отвечающие новым клиническим задачам, должны создаваться междисциплинарными коллективами в рамках как минимум пятилетних проектов с гибкой политикой финансирования грантами, выделяемыми на конкурсной основе. Кроме того, нужно адаптировать существующие регуляторные механизмы под особенности междисциплинарных исследований по созданию СППВР: стимулировать клиницистов к участию за счёт дополнительного финансирования и снижения нормативной нагрузки, разрешить использование внутри коллектива клинических данных или биоматериалов пациентов и передачу их в организации-исполнители проекта, внедрить гибкую систему индикаторов успешности проекта с обязательной демонстрацией готовности технологии к применению, ввести льготный режим и ведомственную поддержку регистрации системы поддержки принятия врачебных решений как медицинского изделия.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Постановка и решение всех описанных в статье задач осуществлялись на базе междисциплинарной лаборатории ИВМ РАН в рамках гранта РНФ № 21-71-30023 по программе “Проведение исследований научными лабораториями мирового уровня в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность С.С. Симакову, Т.М. Гамилову, А.А. Данилову, Ф.Ю. Копылову, П.Ш. Чомахидзе, Д.Г. Гогниевой (задачи диагностики ИБС), А.А. Лёгкому, В.Ю. Саламатовой, Г.В. Копытову, П.А. Каравайкину (реконструкция аортального клапана), Т.К. Добросердовой, А.А. Исаеву, А.А. Свободову, Л.А. Юрпольской (коррекция врождённых пороков сердца), А.С. Юровой, А.И. Тягуновой, А.О. Гладкову, А.В. Лычагину, Е.Б. Калинскому (задачи диагностики опорно-двигательного аппарата).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Vassilevski Yu., Olshanskii M., Simakov S. et al.* Personalized computational hemodynamics: models,

methods, and applications for vascular surgery and antitumor therapy. Academic Press, 2020.

2. *Василевский Ю.В., Симаков С.С., Гамилов Т.М. и др.* Персонализация математических моделей в кардиологии: трудности и перспективы // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. №. 4. С. 911–930.

Vassilevski Yu.V., Simakov S.S., Gamilov T.M. et al. Personalization of mathematical models in cardiology: obstacles and perspectives // Computer research and modeling. 2022, no. 4, pp. 911–930. (In Russ.)

3. Новые математические методы и технологии в актуальных задачах геофизики и биомеханики. Карточка проекта, поддержанного РНФ. https://rscf.ru/prjcard_int?21-71-30023

New mathematical methods and technologies in topical problems of geophysics and biomechanics. A card of a project supported by the Russian Science Foundation. (In Russ.)

4. Основные результаты деятельности лаборатории “Вычислительные технологии геофизики и биомеханики”. <https://www.inm.ras.ru/research/biogeo/#5>

The main results of the laboratory “Computational Technologies of Geophysics and Biomechanics” (In Russ.)

5. Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13269> Federal State Statistics Service. (In Russ.)

6. *Osnabrugge R.L.J. et al.* Aortic stenosis in the elderly: Disease prevalence and number of candidates for transcatheter aortic valve replacement: A meta-analysis and modeling study // J. Am. Coll. Cardiol. 2013, vol. 62, no. 11, pp. 1002–1012.

7. *Du Y. et al.* Natural history observations in moderate aortic stenosis // BMC Cardiovasc. Disord. 2021, vol. 21, no. 108, pp. 1–10.

8. *Фальковский Г.Э., Крупянко С.М.* Сердце ребёнка. Книга для родителей о врождённых пороках сердца. М.: Никея, 2014.

Falkovsky G.E., Krupyanko S.M. The heart of a child. A book for parents about congenital heart defects. Moscow: Nikea, 2014. (In Russ.)

9. *Smith B.E., Selfe J., Thacker D. et al.* Incidence and prevalence of patellofemoral pain: A systematic review and meta-analysis // PLoS One. 2018, vol. 13 (1), e0190892.

10. *Kamat Y., Prabhakar A., Shetty V., Naik A.* Patellofemoral joint degeneration: A review of current management // J. Clin. Orthop. Trauma. 2021, vol. 24, 101690.

11. *Simon J. et al.* Is there a neck-shoulder syndrome? // Glob. J. Anesth. Pain Med. 2019, vol. 1 (1), pp. 1–5.

12. *Pribicevic M.* The epidemiology of shoulder pain: a narrative review of the literature // Pain in Perspective. InTech, 2012.

13. Копылов Ф.Ю., Быкова А.А., Василевский Ю.В., Симаков С.С. Роль измерения фракционированного резерва кровотока при атеросклерозе коронарных артерий // Терапевтический архив. 2015. № 9. С. 106–113.
Kopylov F.Yu., Bykova A.A., Vassilevski Yu.V., Simakov S.S. Role of measurement of fractional flow reserve in coronary artery atherosclerosis // Therapeutic archive (Terapevticheskiy arkhiv). 2015, no. 9, pp. 106–113. (In Russ.)
14. Simakov S.S., Gamilov T.M., Liang F., Kopylov P.Yu. Computational analysis of haemodynamic indices in synthetic atherosclerotic coronary networks // Mathematics. 2021, no. 9, 2221.
15. Vassilevski Yu.V., Gamilov T.M., Danilov A.A. et al. A web-based non-invasive estimation of fractional flow reserve (ffr): models, algorithms, and application in diagnostics // Trends in biomathematics: modeling epidemiological, neuronal, and social dynamics. BIOMAT-2022. Springer, Cham, 2023. Pp. 305–316.
16. Danilov A.A., Gamilov T.M., Liang F. et al. Myocardial perfusion segmentation and partitioning methods in personalized models of coronary blood flow // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2023, vol. 38 (5), pp. 293–302.
17. Gamilov T., Danilov A., Chomakhidze P. et al. Computational analysis of hemodynamic indices in multivessel coronary artery disease in the presence of myocardial perfusion dysfunction // Computation. 2024, vol. 12 (6), 110.
18. Ozaki S. Aortic valve reconstruction using self-developed aortic valve plasty system in aortic valve disease // Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg. 2011, vol. 12 (4), pp. 550–553.
19. Liogky A.A. Computational mimicking of surgical leaflet suturing for virtual aortic valve neocuspidization // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2022, vol. 37, no. 5, pp. 263–277.
20. Liogky A.A. Numerical issues of patient-specific assessment of reconstructed aortic valve // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2025, vol. 46, pp. 736–749.
21. Liogky A.A., Karavaikin P.A., Salamatova V.Yu. Impact of material stiffness and anisotropy on coaptation characteristics for aortic valve cusps reconstructed from pericardium // Mathematics. 2021, no. 9, 2193.
22. Vassilevski Yu.V., Liogky A.A., Salamatova V.Yu. Application of hyperelastic nodal force method to evaluation of aortic valve cusps coaptation: thin shell vs. membrane formulations // Mathematics. 2021, no. 9, 1450.
23. Vassilevski Yu., Liogky A., Salamatova V. How material and geometrical nonlinearity influences diastolic function of an idealized aortic valve // Continuum Mech. Thermodyn. 2023, vol. 35, pp. 1581–1594.
24. Каравайкин П.А., Лёгкий А.А., Данилов А.А. и др. Математическое моделирование замыкающей функции аортального клапана после неокуспидизации // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2022. № 4. С. 369–376.
Karavaikin P.A., Liogky A.A., Danilov A.A. et al. Numerical assessment of aortic valve coaptation after neo-cuspidation procedure // Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery. 2022, vol. 15 (4), pp. 369–376. (In Russ.)
25. Sergeyev Ya., Strongin R., Daniela L. Introduction to global optimization exploiting space-filling curves. Springer Science & Business Media, 2013.
26. Dobroserdova T.K., Yurpolskaya L.A., Vassilevski Yu.V., Svobodov A.A. Patient-specific input data for predictive modelling of the Fontan procedure // Math. Model. Nat. Phenom. 2024, vol. 19, 16.
27. Dobroserdova T.K., Vassilevski Yu.V., Simakov S.S. et al. Two-scale haemodynamic modelling for patients with Fontan circulation // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2021, vol. 36, no. 5, pp. 267–278.
28. Isaev A.A., Dobroserdova T.K., Danilov A.A., Simakov S.S. Physically informed deep learning technique for estimating blood flow parameters in four-vessel junction after the Fontan procedure // Computation. 2024, vol. 12, 41.
29. Dobroserdova T.K., Isaev A.A., Danilov A.A., Simakov S.S. Junction conditions for one-dimensional network hemodynamic model for total cavopulmonary connection using physically informed deep learning technique // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2024, vol. 39, no. 5, pp. 259–271.
30. Seth A., Hicks J.L., Uchida T.K. et al. OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement // PLoS Comput. Biol. 2018, vol. 14 (7), e1006223.
31. Yurova A.S., Tyagunova A.I., Loginov F.B., Vassilevski Yu.V. et al. Patellar motion and dysfunction of its stabilizers in a biomechanical model of the knee joint // Sechenov Medical Journal. 2024, vol. 15 (1), pp. 47–60.
32. Калинин Е.Б., Юрова А.С., Лычагин А.В. и др. Биомеханическая модель надколенника в норме и при повреждении медиальной пателлофemorальной связки // Кафедра травматологии и ортопедии. 2024. № 2 (56). С. 45–52.
Kalinskiy E.B., Yurova A.S., Lychagin A.V. et al. Biomechanical model of the patella in normal conditions and with rupture of the medial patellofemoral ligament // Department of Traumatology and Orthopedics. 2024, no. 2 (56), pp. 45–52. (In Russ.)
33. Yurova A.S., Garkavi A.V., Lychagin A.V. et al. Automated personalization of biomechanical knee model // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2024, vol. 19, pp. 891–902.
34. Yurova A.S., Salamatova V.Yu., Lychagin A.V., Vassilevski Yu.V. Automatic detection of attachment si-

- tes for knee ligaments and tendons on CT images // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2022, vol. 17 (2), pp. 393–402.
35. Yurova A.S., Gladkov A.O., Kalinsky E.B. et al. A biomechanical model for concomitant functioning of neck and shoulder: a pilot study // Sci. Rep. 2024, vol. 14, 31818.

PERSONALIZED MATHEMATICAL MODELS AS A DIAGNOSTIC AND PROGNOSTIC TOOL OF THE CLINICIAN

Yu.V. Vassilevski^{a,b,*}

^a*Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia*

**E-mail: yuri.vassilevski@gmail.com*

The article, prepared on the basis of the author's scientific report at a meeting of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, presents the results of ten years of collaboration between mathematicians and clinicians in the course of interdisciplinary projects, as well as the results obtained within the framework of the recently completed Russian Science Foundation project "New Mathematical methods and technologies in topical problems of geophysics and biomechanics." The results obtained will help in improving the diagnosis of coronary heart disease, patella hyperpression and cervical-brachial syndrome, as well as in planning operations for the reconstruction of the aortic valve and correction of congenital heart disease. Based on the accumulated experience in solving interdisciplinary problems, ways are proposed to improve the effectiveness of interaction between clinicians and mathematicians.

Keywords: mathematical modeling, personalized model, medical decision support system.

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МЕДИЦИНЕ

© 2025 г. Ю.Н. Орлов^{а,*}

^аИнститут прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

*E-mail: ov3159f@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2025 г.

После доработки 20.04.2025 г.

Принята к публикации 28.05.2025 г.

Рассмотрены перспективы развития технологий искусственного интеллекта в области медицины. Проведён анализ тенденций развития искусственного интеллекта в общих и частных вопросах, таких как анализ и классификация больших данных, прогнозирование разладки и создание достоверного отчёта с помощью системы поддержки принятия врачебных решений. Описаны преимущества и ограничения методов машинного обучения в сравнении с экспертизой человеком. Отмечены типы задач для перспективного применения методов искусственного интеллекта — анализ потоков биометрических данных для идентификации состояния пациента и моделирование взаимодействия нескольких лекарственных средств.

Ключевые слова: искусственный интеллект, полифармакотерапия, предиктор разладки, функция распределения.

DOI: 10.31857/S0869587325080036, **EDN:** DTDSKQ

Настоящая статья — о текущем состоянии и перспективах применения методов искусственного интеллекта (далее ИИ) в медицине. Она имеет целью описать достижения и трудности, иногда принципиального характера, связанные с внедрением и развитием технологий автоматической обработки больших данных в повседневную жизнь. Зачастую как обзорные, так и узкоспециальные публикации на эту тему следуют либо восторженной (большинство), либо осторожно пессимистической (меньшинство) точки зрения, при этом научная постановка проблемы не обсуждается. Это связано с тем, что в литературе в основном описываются конкретные применения определённых инструментов в виде обученной нейросети к решению вполне конкретных

задач, но ничего не говорится о том, что применяемый метод плохо работает в ряде других случаев. Альтернативная точка зрения чаще всего основана на утверждении, что естественный интеллект — не чета машине. В результате обсуждение ведётся в поле приложений, то есть не в области науки, а в области технологии.

Представляется важным обрисовать некоторые принципиальные моменты, чтобы более корректно очертить возможности и направления развития собственно научной компоненты. Без такого рассмотрения некоторые аспекты развития ИИ могут быть поняты искажённо. Например, некоторые расширения сферы действия ИИ на, допустим, творческие профессии, не реализованы, по-видимому, не потому, что они невозможны, а в силу экономической нецелесообразности. Точно так же имеющиеся решения могли быть реализованы не потому, что они близки к наилучшим, а из-за возможности получить прибыль на данном отрезке времени в данной отрасли.

Прежде чем перейти к обсуждению текущего состояния и перспектив использования ИИ в медицине, необходимо рассмотреть общие свойства ИИ и наши ожидания от развития соответствующих технологий. Это важно потому, что наряду со специфическими проблемами, возникающими при решении конкретных задач, существуют и общие



ОРЛОВ Юрий Николаевич — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

проблемы ИИ, часть которых обусловлена неоднозначностью самого понятия “искусственный интеллект”.

Строго говоря, нет единого мнения даже относительно формального определения концепта “интеллект”, а значит, затруднено объяснение того, что такое искусственный интеллект. Если следовать толковому словарю русского языка, интеллект — это общая познавательная способность, которая проявляется в том, как человек воспринимает, понимает, объясняет и прогнозирует происходящее, какие решения он принимает и насколько эффективно он действует. Имеются и другие определения. Например, в психологии рассматриваются два типа интеллекта — так называемый основной интеллект, сложившийся в результате обучения, и рабочий интеллект, отвечающий за быструю и точную обработку информации.

С формальной математической точки зрения все эти “интеллекты” очень плохо определены. Человек воспринимает некоторые воздействия физической природы, но то же самое можно сказать о любом неодушевленном предмете. Что касается понимания, то на некотором приближённом уровне у нас есть иллюзия в виде более или менее работоспособной модели причинно-следственных связей между явлениями и нашей реакцией на них, но в точном смысле этого слова понимания, конечно, нет. Поэтому на бытовом уровне интеллект — это то, что характеризует человека в его взаимодействии с окружающим миром, а искусственный интеллект — это формализация человеческого мышления в виде алгоритмов, выполняемых устройством, у которого не предполагается способности к осознанию структуры этих алгоритмов.

Разумеется, поскольку мы пока ещё плохо осведомлены о том, как именно происходит мыслительный процесс, не представляется возможным корректно сформулировать наши ожидания относительно искусственного интеллекта. Считается, что он в каком-то смысле имитирует человеческое мышление на уровне выполнения формальных логических операций “если, то”, “и”, “или”, “не”. Надо бы ещё добавить “равенство”, но с этим существует проблема, которая, по сути, определяет все сложности задачи распознавания образов, что надо обсудить подробнее.

Логическому выводу из анализа той или иной ситуации предшествует идентификация этой самой ситуации, то есть распознавание образа в заданном пространстве признаков. Распознавание имеет теоретический и практический аспекты. В теоретическом плане оно сводится к математически точному решению некоторого уравнения вида $f(x) = 0$, где f выражает правило вычисления расстояний между элементами рассматриваемого множества, а x — набор параметров, характеризующих эти элементы. Точное решение, даже если оно существует

в явном аналитическом виде, очень редко (строго говоря — по мере нуля) является таковым на практике. Например, решение квадратного уравнения в области действительных чисел может быть рациональным, а может быть и иррациональным числом. В последнем случае оно нам де-факто неизвестно, ибо представляется бесконечной непериодической десятичной дробью, все разрядные цифры которой наперёд не известны. Тем не менее такое число, например корень квадратный из двух, можно использовать как символ решения соответствующего квадратного уравнения. При этом подразумевается, что существует алгоритм, позволяющий вычислить это значение с любой наперёд заданной точностью.

Что касается практических вычислений, то точные решения вообще никогда не могут быть реализованы, поскольку для этого нужно распознавание нуля с любой точностью, что невозможно. Следовательно, точность идентификации текущего состояния зависит от точности инструмента измерения параметров этого состояния, точности модели о соответствии значений параметров определённому состоянию или состояниям, точности вычислительной процедуры по распознаванию нуля. Если измерение носит статистический характер, к перечисленным точностям добавляется точность, с которой значения параметров принадлежат определённому доверительному интервалу.

Если не обсуждать аспекты точности идентификации состояния, то качество формулируемых на этой основе выводов, то есть рекомендаций о дальнейших действиях, не будет иметь математически корректного основания. Поэтому выяснять, насколько искусственный интеллект отвечает свойствам человеческого мышления, не имея корректных знаний ни о свойствах последнего, ни о точности идентификации, представляется весьма рискованным.

Кроме того, для понимания текущего состояния и вектора развития ИИ надо учитывать, что появление ИИ, по сути, является побочным эффектом разработок систем слежения. Имеется в виду не область применения, а создание приборов, которые передают показания с высокой частотой. Возможность синхронизации показаний телеметрических и биометрических датчиков с механически отсчитываемыми промежутками времени привела к необходимости записи этих данных, даже если из них потребуется всего лишь несколько малых эпизодов (как при применении видеорегистраторов для уточнения причин аварийной ситуации). То есть первоначально большие данные записывались не для того, чтобы провести их статистическую обработку, хотя, конечно, были и такие целенаправленно проводимые эксперименты, как правило, в области физики. Следовательно, многие данные, которыми мы располагаем сегодня, получены без первоначального целеполагания относительно их использования для

машинного обучения. Последующие шаги были направлены на сбор как можно большего количества данных, но выяснилось, что они оказываются плохо структурированными. Возникла задача автоматической кластеризации поступающей информации, что при потоках данных высокой интенсивности становится весьма проблематичным. После этого потребовалось выяснить, насколько данные полны, для того чтобы по ним можно было обучать автоматическую систему. Полнота же предполагает получение совокупности всех возможных состояний, что практически далеко не всегда достижимо. Это вызывает разочарование в методе, но одновременно позволяет взглянуть на проблему более широко.

Отмеченные сложности связаны не столько с ИИ, сколько с нашей собственной способностью интерпретировать текущие жизненные ситуации в рамках накопленного опыта. Следовательно, важно понимать, какие результаты в принципе могут быть получены с помощью машинной обработки, насколько они шире или уже, чем возможности человека, — не в скорости принятия решения, а в его адекватности.

Эти общие вопросы в каждой сфере человеческой деятельности приобретают определённую специфику. В этой связи надо рассматривать пары составляющих: научную и технологическую, общую и частную, детерминированную и случайную. Формализация каждой из них приводит к развитию соответствующего математического аппарата. Это означает, что внедрение ИИ требует не работы на стыке специальностей, а двойного образования специалистов. Это особенно важно в случае решения медицинских задач, потому что необходимо понимать, в какой мере данные персонифицированной медицины могут быть статистически обобщены на общечеловеческом уровне.

Как и в других областях человеческой деятельности, методы ИИ в медицине имеют общий и частный аспекты применения. Под общим аспектом подразумевается использование методов ИИ для автоматизации сбора и обработки больших объёмов информации в виде текстовых документов или в виде высокоинтенсивных потоков числовых данных. Такие задачи не требуют разработки специального “медицинского” ИИ, медицинские аспекты находят отражение в обозначении соответствующих атрибутов в названиях того, что анализируется. Частные аспекты относятся к тем конкретным задачам, которые специфичны именно для медицины. В таких случаях использование ИИ требует разработки специальных методов исследования. Рассмотрим кратко общие направления работ по расширению области применения ИИ.

Первое и самое простое в научном плане направление — цифровизация медицинской отрасли, то есть использование электронных форм сопровождения процессов. Последние, как и направления

работ, подразделяются на общие и специфические. Общие процессы — это строительство медицинских объектов, ведение бухгалтерского учёта в соответствующих организациях, разработка образовательных программ и т.п. К специфическим процессам относятся, например, электронное сопровождение медицинских услуг, распознавание пациента по фотографии или видеосъёмке. Развитие этого направления связано в основном с усовершенствованием технологий, не относящихся напрямую к ИИ.

Второе направление — это формирование баз данных, то есть сбор информации и составление стандартизованных статистических отчётов по ним. Проблемой неспецифического характера является разработка оптимального кодирования для сокращения требуемой памяти и ускорения поиска нужной информации. Поскольку, как правило, требуется именно точный ответ на запрос — поиск карты конкретного пациента или список побочных эффектов данного лекарственного препарата, то задача о приближённом поиске так называемого ближайшего соседа к запросу не возникает. Это упрощает научную постановку задачи, но увеличивает требования к технологиям хранения информации и к алгоритмам поиска.

Отметим, что это второе общее направление является надстройкой над первым направлением, то есть использует результаты, полученные в ходе трансформации данных из устно-письменной формы в электронную. В основном на этих двух этапах задачи относятся к области сбора и хранения больших данных, причём эти данные являются размеченными — заранее известно, к какой категории они принадлежат.

Третье общее направление использования ИИ — разработка архитектуры системы поддержки принятия решений (СППР), в частности, врачебных решений. Здесь необходим уже не только сбор размеченной информации, но и её частичная статистическая обработка. Решение, которое нужно получить в автоматическом режиме, — это список событий, следующих за данным известным состоянием, с указанием эмпирической частоты их возникновения. Например, часто встаёт вопрос о послеоперационных осложнениях, о побочных эффектах использования препарата и т.п. Проблема общего характера — неполнота статистической информации о человеческом организме в целом, а также неоднозначность выделения так называемых элементарных событий в теоретико-вероятностной схеме описания работы СППР. Специфическим медицинским аспектом применения СППР является, вообще говоря, недопустимость ошибки “пропуска цели”, если целевая функция состоит в обнаружении заболевания. Нулевая статистическая гипотеза обычно сводится к тому, что пациент здоров. В этих терминах непризнание действительно заболевшего человека больным — статистическая ошибка второго рода, или

ложноотрицательный вывод. Разумеется, и ошибка первого рода тоже не очень хороша (если здорового человека признают больным), но в большинстве практических примеров эта ошибка не имеет (хотя и может иметь) критических последствий.

Нетривиальный момент в разработке СППР — поиск определяющих признаков в условиях, когда нет более или менее надёжной детерминированной модели взаимосвязи явлений. В данном случае перспективны методы машинного обучения, поскольку с точки зрения теории познания детерминизм — это следствие усреднения большого числа случайных факторов, причём случайность выступает здесь не как некое иное состояние (материи, данных и т.п.), а как проблема точности инструмента измерения. В соответствии с таким подходом детерминизм вообще отсутствует, а логические связи возникают в результате усреднения. Трудность состоит в том, что собрать все возможные данные нельзя, так как это требует бесконечной машинной памяти, и это есть принципиальное ограничение. Следовательно, надо отобрать какое-то конечное число признаков, что, естественно, снижает эффективность применения машинных методов. Ведь если какой-то параметр считается настолько несущественным, что данные по нему не фиксируются, то он и не поступает в виде входной информации. В то же время увеличение размерности задачи препятствует качественно процессу машинного обучения, поскольку требует такого количества данных, которое невозможно получить эмпирическим статистическим путём.

Если, допустим, система (например, человек) характеризуется только одним параметром — скажем, возрастом, то с нужной точностью всех людей можно распределить по нескольким возрастным группам. Пусть таких групп n_1 . Если есть второй параметр — пол, то для каждого человека из одного из классов по первому параметру есть $n_2 = 2$ возможностей по второму, то есть всего возможностей $n_1 n_2$. Даже если предположить, что по каждому параметру нам достаточно градация из двух состояний, то для P независимых параметров получается фазовое пространство размерности 2^P . Очевидно, что число состояний на практике не может быть больше, чем число людей N , поэтому во всяком случае должно быть $P < \log_2 N$. Для оценки сложности можно взять численность населения порядка 10 млрд человек и получить, что максимальное число параметров в таком случае составляет 33. Это очень мало для реальных систем — как биологических, так и технических. Ситуация ещё более усложняется, если число градаций больше двух. Например, говоря о здоровье человека, можно обсуждать сначала два состояния — здоров и болен. Но по второму состоянию даже число классов заболеваний, определяемых числом функционирующих в организме систем, порядка 20, а различных заболеваний — несколько тысяч. Собственно, таким числом параметров (несколько тысяч) и должен ха-

рактеризоваться заболевший человек; но тогда ясно, что невозможно собрать необходимую для обучения машины статистическую информацию. Нужного количества людей для этого процесса просто нет.

Таким образом, возникает необходимость использовать гибридный интеллект, который предполагает комбинацию статистических данных и уже апробированных физических (экономических и др.) моделей в виде детерминированных функциональных зависимостей. Мы сами, собственно, тоже пользуемся таким гибридным интеллектом на стадии обучения: ребёнок в основном следует указаниям взрослых, хотя часть этих указаний может быть ошибочной. Но это гораздо экономичнее, чем совершение гораздо большего числа ошибок при использовании исключительно личного опыта (обучение на собственных ошибках).

Трудность в разработке гибридных моделей связана с тем, что необходимо отобрать параметры, которые будут иметь статистический характер, и другие, условно детерминированные. Но, как было сказано выше, детерминированные параметры — это те же случайные, только более тщательно измеренные. Спрашивается: может быть, следует увеличить точность измерений и разработать более детальные детерминированные модели, вместо того чтобы использовать технологии ИИ? В общем случае ответ на этот вопрос будет отрицательным (что может вызвать сожаление сторонников детерминизма). Если составить достаточно сложную модель из многих параметров, то она может оказаться очень чувствительной к вариации настраиваемых коэффициентов или начальных условий. Примеры таких систем известны: это многочисленные так называемые модели хаотической динамики, когда чувствительность по параметрам существенно превосходит точность измерения самих параметров.

Следовательно, хорошую, то есть адекватную нашим потребностям СППР, нельзя построить только статистическим или только детерминистским путём. Это важный вывод на современном этапе развития ИИ. Каково же оптимальное соотношение между статистикой и детерминизмом в таких моделях, предстоит выяснить в ближайшем будущем.

Остановимся ещё на одном достаточно общем аспекте применения ИИ в медицинской области — анализе и классификации медицинских текстов. Сама по себе задача классификации текстов на естественных языках сейчас достаточно популярна не только в связи с автоматическим переводом, но и просто из-за необходимости отсеивать большой объём лишней с профессиональной точки зрения информации. Поскольку поток научных публикаций по медицинской тематике в виде статей в специализированных журналах, материалов конференций, монографий составляет более 500 тыс. в год, проанализировать их вручную не представляется возможным. Поэтому важно отли-

чать научно-популярные тексты, а также разного рода дилетантские рассуждения и мошеннические схемы от собственно научных публикаций. Кроме того, последние необходимо классифицировать не только по тематике, но и по уровню научной значимости и по ряду наукометрических индикаторов. Используемые в этой области методы статистической классификации пока далеки от совершенства, но есть положительные тенденции. Дело в том, что при тестировании каждого метода на достаточно большом корпусе текстовых документов наблюдается ошибка классификации порядка 20–30%. В то же время после итерационного исключения ошибочно выделенных текстов остаётся достаточно большое множество, состав которого определяется безошибочно. Если удастся понять, какие факторы приводят к ошибкам автоматической классификации, можно будет строить алгоритмы внутренней коррекции действий ИИ в данной сфере.

Однако следует учесть, что величина ошибки при тестировании классификатора зависит от точки зрения эксперта, который размечает данные. Часто бывает, что мнения разных экспертов по тому или иному вопросу не совпадают. Это относится к той сфере интеллектуального анализа, для которой нет общепринятой числовой оценки, получаемой в результате некоторого физического измерения. Путём пересчёта слов, словосочетаний, букв, формул, прочих символов нельзя однозначно разделить тексты, допустим, “по физике” от текстов “по химии”, не говоря уже об их разделении внутри одной специальности. Следовательно, по тем фрагментам областей человеческой жизни, по которым в обществе достигнут консенсус, машинное обучение может быть выведено на уровень эксперта, а при сосуществовании разных точек зрения на одну и ту же проблему статистика требует сначала классифицировать самих экспертов. Но, как известно, на вкус и цвет товарища нет, поэтому сделать ИИ, который будет правильно решать задачи в любой области, просто невозможно в силу различия в оценках одной и той же ситуации разными людьми.

Причина этих различий коренится не в незнании правильного решения, а в том, что сами тестеры, то есть люди, неодинаковы, каждому человеку именно его решение видится правильным, но оно может не подходить другому. Особенно выпукло это проявляется при настраивании СППР на принятие персонализированных решений в области медицины. Какие лекарственные препараты следует назначить данному конкретному пациенту? Для этого следует найти таких же людей в истории обучения, но, как понятно из предыдущего анализа, это невозможная задача. Поэтому ошибки принятия решений с помощью ИИ неизбежны. Важно, чтобы этих ошибок было меньше, чем у экспертов.

Теперь, когда понятны общие ограничения подходов с использованием ИИ, перейдём к описанию

некоторых задач, для решения которых потребовалось разработать методы, учитывающие именно медицинскую предметную область.

К настоящему времени предложено большое количество программных продуктов, с помощью которых происходит автоматическая обработка медицинских изображений. Эти программы ускоряют анализ рентгенограмм, компьютерных томограмм и МРТ. Добавление к ним приставки “ИИ”, по сути, означает прикрепление обученной СППР к физическому прибору. То есть в задачах распознавания патологий по снимкам главным является инструмент измерения, и потому эти практические приложения не требуют создания специального медицинского ИИ. Распознавание медицинских изображений развивается сейчас наиболее быстрыми темпами, но это обычная экспансия метода в сопредельную область. Нас интересуют другие примеры — когда задача не может быть решена имеющимся готовым инструментом.

Одна из таких важных задач, требующих специального подхода, — предсказание сочетаемости различных лекарственных средств (ЛС). Необходимо разработать модель оценки риска совместного применения нескольких ЛС с точки зрения побочных эффектов на основе обработки информации, содержащейся в инструкциях по применению ЛС, медицинских справочниках, научных публикациях и иных открытых источниках. Проблема состоит в том, что, строго говоря, мы не знаем, какой побочный эффект вызовет приём того или иного препарата у конкретного пациента, но знаем статистику побочных эффектов у разных групп людей. Поскольку заранее не известно, к какой группе относится данный пациент, то предполагаемый риск носит весьма приблизительный характер. Неопределённость связана также и с тем, что анализ возможного химического взаимодействия между компонентами разных ЛС зависит от метаболизма пациента в момент приёма лекарств, а это ещё один случайный фактор. Поэтому точного метода, который позволял бы определить, как приём некоторого набора ЛС скажется на пациенте, в настоящее время не существует. Приближённые же методы в значительной мере опираются на опыт практикующих врачей. Обобщение такого опыта совместно с экспертной моделью обработки усреднённой информации, содержащейся в инструкциях, представляет специфическую задачу именно из области медицинского ИИ.

Отметим, что статистическая репрезентативность имеющихся данных применительно к этой задаче заведомо недостаточна, что связано с большой размерностью задачи. В частности, при составлении обучающего массива данных в области полифармакотерапии отсутствует достоверная статистика по эффективности и безопасности совместного применения нескольких препаратов. Например, если анализируется возможность назначения пяти и бо-

лее ЛС из перечня хотя бы 100 препаратов, не говоря уже о списках в 1000 и более лекарств, то надо собрать статистику по последствиям приёма каждого из возможных $100^5 / 5! \approx 10^8$ сочетаний. Если различных последствий (побочных эффектов и типов взаимодействий препаратов) хотя бы порядка 100, то размерность вектора сочетаний препаратов и последствий достигает 10^{10} , что превосходит численность населения Земли, тогда как по каждой компоненте случайного вектора следует иметь хотя бы сотню наблюдений для получения сколько-нибудь достоверной оценки вероятности последствия. Поскольку это технически невозможно, то необходимо разработать модель косвенной оценки эффективности полифармакотерапии.

Исследования в области применения машинного обучения для анализа взаимодействия ЛС предпринимаются давно и ведутся достаточно интенсивно. Однако практически все эти работы относятся к анализу последствий парного взаимодействия [1–5], тогда как практический интерес представляет анализ приема 3–5 и более ЛС. Парный анализ привлекателен тем, что он может быть проведён для весьма большого (порядка 10 тыс.) количества ЛС. Обзоры работ в этой области содержатся, например, в работах [6, 7]. Рассматриваются также модели машинного обучения для предсказания побочных эффектов парного взаимодействия ЛС [8, 9]. Однако увеличение числа одновременно принимаемых препаратов не позволяет провести полноценное исследование из-за большой размерности такой задачи.

Существуют также относительно немногочисленные практические исследования, которые представляют собой слабо систематизированные опытные данные по лечению конкретных пациентов. В них отмечается, что в связи с увеличением числа одновременно принимаемых препаратов вероятность нежелательного лекарственного взаимодействия повышается, но никаких количественных характеристик не приводится, поскольку статистическая достоверность наблюдений невелика. Указывается также, что часто приходится назначать от 4 до 8 препаратов одновременно; группу высокого риска в этом отношении представляют лица пожилого возраста.

Таким образом, существенная неполнота экспериментальных данных не позволяет систематизировать их. Также нет возможности провести полноценное машинное обучение по анализу одновременного приёма, скажем, 10 лекарственных средств, выбираемых из 10 тыс. препаратов, из-за большой размерности задачи. Поэтому необходимо разработать упрощённую методику автоматического извлечения и комбинации информации, содержащейся в инструкциях по применению ЛС. Это станет первым шагом на пути формирования системы поддержки принятия врачебных решений в данной области.

В работе [10] построена графовая ранговая модель, позволяющая в результате интеллектуального чтения инструкций по разделам “фармакокинетика”, “фармакодинамика” и “побочные эффекты” строить схемы взаимодействия совокупности ЛС и давать на этой основе рекомендации по приёму препаратов в традиционном виде: “под наблюдением врача”, “с осторожностью”, “не рекомендуется”. Удобство графового подхода состоит в том, что необходимым (хотя и недостаточным) условием для сочетания нескольких ЛС является полная связанность соответствующего подграфа допустимых эффектов и воздействий. Например, для того чтобы три ЛС были совместимы, необходимо, чтобы они были попарно совместимы, что и означает полную связанность этой структуры. Такой предварительный отбор позволяет уменьшить количество перебираемых сочетаний, поскольку удаётся отсеять заведомо невозможные комбинации. Для большого числа сочетаемых препаратов это существенно.

Другой пример в области медицинского ИИ — создание предиктора приступа эпилепсии у соответствующих больных на основе анализа данных электроэнцефалограмм (ЭЭГ). Проблема состоит в том, что потоки данных, снимаемых по каждому отведению, не являются стационарными в статистическом смысле, поэтому для них сложно решать классическую задачу о разладке. В работе [11] предложен индикатор, основанный на изменении уровня нестационарности рядов ЭЭГ в определённый промежуток времени перед приступом. Этот индикатор строится статистическим образом; успех в его применении связан с тем, что объём данных для обучения оказывается достаточным, как и лаг до обнаружения разладки. Важное свойство индикатора нестационарной разладки — нулевая ошибка пропуска цели. Это, как было сказано выше, принципиально для применения технологий медицинского ИИ.

Перспективы развития медицинского ИИ, помимо упомянутых выше традиционных направлений собственно ИИ, связаны прежде всего с решением задачи предсказания состояния организма по фиксируемым потокам биометрических данных. Эти потоки не являются стационарными, поэтому специфика математического аппарата в этой области сводится к кинетическим уравнениям относительно многомерных плотностей функций распределения взаимосвязанных параметров. Кинетический подход позволяет эффективно решать проблему сокращения описания, то есть понизить размерность задачи до практически реализуемой величины. Тем не менее объём анализируемых данных по-прежнему велик, так что развитие технологий ИИ неразрывно связано с увеличением вычислительной мощности суперкомпьютеров. По оценкам, минимальная мощность, при которой можно говорить об успешном практическом решении задач медицинского ха-

рактера в масштабах региона, составляет величину порядка 10^{16} операций в секунду. Поэтому наряду с разработкой чисто математических моделей ИИ представляется необходимым существенно нарастить парк отечественной вычислительной техники.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект № 23-75-30012.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Feixiong Cheng, Zhongming Zhao*. Machine learning-based prediction of drug–drug interactions by integrating drug phenotypic, therapeutic, chemical, and genomic properties // *J. Medicine Information Association*, 2014, no. 21, pp. 278–286.
2. *Tengfei Lyu, Jianliang Gao, Ling Tian, Zhao Li et al.* A Multimodal Deep Neural Network for Predicting Drug–Drug Interaction Events // *Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21)*, pp. 3536–3542.
3. *Xiang Yue, Zhen Wang, Jingong Huang et al.* Graph embedding on biomedical networks: methods, applications and evaluations // *Bioinformatics*, 2020, no. 36(4), pp. 1241–1251.
4. *Xu Chu, Yang Lin, Yasha Wang et al.* A multi-task semi-supervised learning framework for drug–drug interaction prediction. // *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2019, pp. 4518–4524.
5. *Farkas D., Shader R.I., von Moltke L.L., Greenblatt D.J.* Mechanisms and consequences of drug–drug interactions. // In: *Gad SC, ed. Preclinical Development Handbook: ADME and Biopharmaceutical Properties*. Philadelphia: Wiley, 2021.
6. *Марцевич С.Ю., Лукина Ю.В., Драпкина О.М.* Основные принципы комбинированной медикаментозной терапии – фокус на межлекарственное взаимодействие // *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2021. № 20(7). С. 3031.
Martsevich S.Yu., Lukina Yu.V., Drapkina O.M. Basic principles of combination drug therapy – focus on drug interactions // *Cardiovascular therapy and prevention*. 2021, no. 20(7), p. 3031. (In Russ.)
7. *Huimin Luo, Weijie Yin, Jianlin Wang et al.* Drug–drug interactions prediction based on deep learning and knowledge graph: A review // *iScience* 27, 2024, March, 109148.
8. *Yifan Deng, Xinran Xu, Yang Qiu et al.* A multimodal deep learning framework for predicting drug–drug interaction events // *Bioinformatics*. 2020, no. 36(15), pp. 4316–4322.
9. *Ryu J.Y. et al.* (2018) Deep learning improves prediction of drug–drug and drug–food interactions // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2018, no. 115, pp. E4304–E4311.
10. *Орлов Ю.Н., Сивакова Т.В., Шимановский Н.Л.* Ранговая модель оценки рисков полифармакотерапии // *Математическое моделирование*. 2025. Т. 37. № 2. С. 99–110.
Orlov Yu.N., Sivakova T.V., Shimanovsky N.L. Rank model for assessing the risks of polypharmacotherapy // *Mathematical modeling*. 2025, vol. 37, no. 2, pp. 99–110. (In Russ.)
11. *Кислицын А.А., Козлова А.Б., Корсакова М.Б., Орлов Ю.Н.* Индикатор разладки для нестационарных случайных процессов // *Доклады РАН. Сер. Математическая*. 2019. Т. 484. № 4. С. 393–396.
Kislitsyn A.A., Kozlova A.B., Korsakova M.B., Orlov Yu.N. Disorder indicator for non-stationary random processes // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Series: Mathematical*. 2019, vol. 484, no. 4, pp. 393–396. (In Russ.)

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN MEDICINE

Yu.N. Orlov^{a,*}

^aKeldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: ov3159f@yandex.ru*

The prospects for the development of artificial intelligence technologies in the field of medicine are considered. The analysis of trends in the development of artificial intelligence in general and specific issues, such as the analysis and classification of big data, predicting disruption and creating a reliable report using a medical decision support system. The advantages and limitations of machine learning methods in comparison with human expertise are described. The types of tasks for the prospective application of artificial intelligence methods are noted, such as analyzing biometric data flows to identify the patient's condition and modeling the interaction of several drugs.

Keywords: artificial intelligence, polypharmacy, disorder predictor, distribution function.

ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ В ЭПИДЕМИОЛОГИИ

© 2025 г. В.Г. Акимкин^{а,*}

^аФБУН ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора,
Москва, Россия

*E-mail: vgakimkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.02.2025 г.

После доработки 10.05.2025 г.

Принята к публикации 03.06.2025 г.

Цифровая трансформация — ключевое направление в современной эпидемиологии, обладающее значительным потенциалом с точки зрения улучшения общественного здравоохранения. Внедрение искусственного интеллекта и методов машинного обучения в процессы диагностики и прогнозирования заболеваемости инфекционными болезнями повышает точность и скорость эпидемиологического анализа, позволяет обрабатывать большие объёмы данных, выявлять закономерности распространения инфекций и разрабатывать стратегии их предотвращения.

В статье рассмотрены вопросы цифровизации эпидемиологического надзора, а также три программные платформы, разработанные сотрудниками ФБУН ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора для реализации эпидемиологического контроля за коронавирусной инфекцией и другими инфекционными болезнями. Платформа VGARus стала ключевым инструментом мониторинга динамики пандемии COVID-19 на территории России. Потенциал платформы выходит за рамки исследований SARS-CoV-2: она расширяется для сбора данных о других патогенах. Платформа SOLAR создана с целью консолидации сведений о результатах лабораторных исследований на SARS-CoV-2 и позволяет осуществлять эффективный обмен данными между различными медицинскими учреждениями и государственными органами, а также передавать информацию о проведённых исследованиях непосредственно на портал «Госуслуги» в личные кабинеты физических лиц. SOLAR предоставляет возможность централизованного хранения всех результатов лабораторных исследований, связанных с COVID-19, что упрощает их дальнейшее изучение. Задачу комплексного анализа данных о развитии эпидемического процесса на территории России с выявлением категорий и территорий риска заражения решает ещё одна разработка Института — аналитическая платформа EpidSmart.

Статья подготовлена на основе доклада, с которым автор выступил на заседании Президиума РАН 24 декабря 2024 г.

Ключевые слова: эпидемиологический надзор за инфекционными болезнями, цифровая трансформация государства, пандемия COVID-19, эпидемиологический мониторинг, секвенирование геномов вируса, платформа VGARus, платформа SOLAR, интернет вещей, аналитическая платформа EpidSmart, математические методы анализа, технологии искусственного интеллекта.

DOI: 10.31857/S0869587325080043, EDN: DTEQGG



АКИМКИН Василий Геннадьевич — академик РАН, директор ФБУН ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора.

Современный этап развития общества невозможно представить без цифровых технологий и расширения сферы их использования. На наших глазах происходит переход к информационному обществу, в котором большинство работающих граждан участвует в производстве, хранении и анализе информации. В результате растёт численность IT-специалистов, создаются новые специальности и бизнес-процессы, наблюдается масштабная цифровая трансформация.

На международном форуме «Kazan Digital Week — 2024» председатель Правительства РФ М.В. Ми-

шустин сообщил о всесторонней поддержке сферы информационных технологий в целях развития инноваций и прорывных решений, их активного применения в России. Он подчеркнул, что сегодня в нашей стране в IT-отрасли задействованы свыше 900 тыс. специалистов, их количество за последние четыре года увеличилось практически в полтора раза [1]. По данным сайта Statista.com, в мире с 2018 по 2024 г. численность работающих в IT-сфере выросла с 23 до 28.7 млн. Оборот российских компаний в области информатизации за 2024 г. составил более 10 млрд руб., а мировой оборот продукции в IT-индустрии — более 9 трлн долл.

Цифровая трансформация входит в перечень актуальных для российского общества задач, установленных Указом Президента РФ от 07.05.2024 № 309 “О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года” (цифровая трансформация государственного и муниципального управления, экономики и социальной сферы) [2] и постановлением Правительства РФ от 10.10.2020 № 1646 “О мерах по обеспечению эффективности мероприятий по использованию информационно-коммуникационных технологий в деятельности федеральных органов исполнительной власти и органов управления государственными внебюджетными фондами” [3]. В 2024 г. был запущен национальный проект “Экономика данных и цифровая трансформация государства”, включающий восемь профильных федеральных проектов, в том числе “Искусственный интеллект”, в задачи которого входят внедрение сервисов искусственного интеллекта (ИИ-сервисов) во все отрасли экономики, усиление кадрового обеспечения, поддержка компаний-разработчиков и перевод всех сфер гражданского общества на новые принципы работы за счёт создания инфраструктуры вычисления и хранения данных [4].

Цифровая трансформация затрагивает все сферы жизни и подразумевает как формирование цифровой инфраструктуры для функционирования государства и организаций, так и широкое внедрение непрерывного процесса стратегической и тактической цифровой эволюции в производственные процессы. Базовые технологические векторы цифровой трансформации [5], например, Интернет вещей¹ [6], большие данные (Big Data) [7, 8], облачные решения [9] и искусственный интеллект (ИИ) [10], стремительно проникают в повседневную жизнь и применяются для решения актуальных задач.

Определённую сложность представляет налаживание быстрого и эффективного междисциплинарного взаимодействия специалистов в области

эпидемиологии, прикладной математики, биотехнологий, биоинформатики, физики, химии, других смежных наук. Поскольку современная медицина — одна из самых наукоёмких отраслей, процесс её информатизации происходит особенно быстро и кардинально [11–13]. При этом эпидемиология, занимающаяся изучением заболеваний на популяционном уровне, всегда была одной из передовых медицинских дисциплин в плане использования количественных методов анализа. Активное развитие сетевых технологий и технологий сбора и обработки данных в сочетании с появлением новых направлений в эпидемиологии (молекулярно-генетический мониторинг в системе эпидемиологического надзора) привело к накоплению значительных объёмов информации, соответствующих критериям Big Data. Эти данные могут быть представлены в различных форматах, а их обновление происходит постоянно и в сжатые сроки [14–16]. Обработка и анализ массива информации требует создания инновационных специализированных программных инструментов, а также разработки новых методических подходов к анализу [17].

Система эпидемиологического надзора за инфекционными болезнями нацелена на минимизацию ущерба от них путём проведения эффективного комплекса противоэпидемических и профилактических мероприятий, что невозможно без прогнозирования динамики эпидемического процесса при разных условиях его течения, а также предварительной оценки эффективности противоэпидемических мероприятий [18]. Так как любая прогностическая модель основана на предположениях о закономерностях рассматриваемого явления, то качество прогнозирования напрямую зависит от степени теоретической разработанности изучаемой проблемы. Закономерности, присущие эпидемическому процессу, детально описаны основоположниками отечественной эпидемиологии В.Д. Беляковым [19], Л.В. Громашевским [20], Б.Л. Черкасским [21] и другими учёными-эпидемиологами. Однако использование при прогнозировании таких сведений, как структура популяции возбудителя, количество инфицированных лиц, в том числе бессимптомных, и практическая реализация адекватных математических моделей в виде алгоритмов и программ, стали возможными только с появлением в системе эпидемиологического надзора цифровых платформ.

Современные информационные технологии сбора, хранения и анализа данных доказали свою важность особенно во время пандемии COVID-19. В считанные недели были созданы системы сбора и агрегации результатов лабораторной диагностики на наличие возбудителя SARS-CoV-2 (ПЦР) или антител к нему (ИФА), работающие в режиме реального времени и интегрированные с государственной системой хранения персональных данных “Госуслуги”. Это позволило всего через несколько

¹ Интернет вещей — это технология, построенная на способности устройств обмениваться данными через Интернет без участия человека. Такая система объединяет устройства в компьютерную сеть и позволяет им собирать, анализировать, обрабатывать и передавать сведения.

часов после получения результатов анализа менять ковидный статус гражданина. Налаженная система ежедневного сбора и статистического анализа сведений о случаях заболевания COVID-19 существенно облегчала расширенный оперативный контроль за эпидемической обстановкой.

Данные по активности механизма передачи SARS-CoV-2, полученные благодаря математическим моделям эпидемического процесса к середине весны 2020 г., позволили количественно оценить степень контагиозности и спрогнозировать динамику заболеваемости [22]. Было наглядно показано, что для предупреждения активной передачи возбудителя необходимы жёсткие режимно-ограничительные меры, без которых пандемия могла достичь таких масштабов, когда ресурсов здравоохранения не хватило бы для оказания медицинской помощи всем нуждающимся [23]. В результате большинство стран приняли прагматичную концепцию противоэпидемических мероприятий умеренной интенсивности, которые позволили контролировать уровень заболеваемости в приемлемых границах [24].

Три программные платформы для реализации эпидемиологического надзора за коронавирусной инфекцией (COVID-19) и другими инфекционными болезнями. Одним из новых направлений деятельности в системе современного эпидемиологического надзора стало быстрое и масштабное внедрение высокопроизводительного секвенирования и биоинформатических инструментов для детального изучения геномной вариабельности патогенов, в частности возбудителя COVID-19 – SARS-CoV-2 [25]. Стоит отметить, что по мере развития масштабов пандемии многие страны, которые ранее в меньшей степени опирались на собственные геномные данные, начали активно проводить эксперименты по секвенированию вирусных геномов, что позволило формировать более эффективные стратегии по сдерживанию инфекции [26].

Российская Федерация не стала исключением, и на основании постановления Правительства РФ от 23.03.2021 № 448 "Об утверждении Временного порядка предоставления данных расшифровки генома возбудителя новой коронавирусной инфекции (COVID-19)", а также в целях выполнения задач, определённых в постановлениях Правительства РФ от 02.12.2021 № 2178 и от 23.12.2022 № 2395 (касающихся функционирования федеральной государственной информационной системы сведений санитарно-эпидемиологического характера и организации передачи данных по расшифровке геномов возбудителей инфекций), специалистами ФБУН ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора (далее Институт) была создана платформа VGARus (Virus Genome Aggregator of Russia). Данный ресурс обеспечивает централизованный сбор геномных последовательностей вместе с данными эпидемиологического характера, предоставляя инструменты

анализа загруженных геномов и выступая в качестве площадки для научно-организационного взаимодействия учреждений, осуществляющих молекулярно-генетический мониторинг в рамках эпидемиологического надзора. К приоритетным задачам платформы на данный момент относятся агрегация информации о вирусных и бактериальных геномах, централизованный анализ генетического разнообразия и временной динамики выявляемых геновариантов на территории России. Первоначально VGARus предназначалась исключительно для мониторинга SARS-CoV-2, однако достаточно быстро сфера её применения была расширена на многие другие патогены.

Процесс мониторинга изменчивости вирусных геномов, как правило, включает в себя ряд последовательных этапов (рис. 1). В первую очередь лаборатория, выполняющая секвенирование, получает биологический материал из диагностических подразделений, в том числе расположенных при стационарах. Качество образцов обычно предварительно оценивается с помощью ПЦР-анализа, позволяющего определить вирусную нагрузку и пригодность материала для дальнейшего секвенирования по технологии NGS (next generation sequencing). Лаборатория-отправитель вносит сама или предоставляет соответствующие метаданные на платформу VGARus, включая информацию о возрасте и поле пациента, статусе вакцинации, дате и регионе забора биологического материала, а также другие релевантные сведения. Специализированная секвенирующая лаборатория выполняет пробоподготовку биоматериала и последующее секвенирование геномов патогенов. На следующем этапе проводится первичный биоинформатический анализ, предусматривающий контроль качества полученных данных, сборку генома и базовую проверку валидности последовательностей (оценка степени их покрытия и т.п.).

После загрузки в систему платформа осуществляет автоматическую валидацию геномной информации (соответствие патогену, страница которого выбрана для загрузки файла, указанному типу секвенирования – полногеномному или фрагментному – и т.п.). Если выявляется несоответствие качества собранных геномов заданным критериям, образцы помечаются как невалидные, а в диагностическую лабораторию направляется соответствующее уведомление. Если же геномная информация удовлетворяет критериям качества, то платформа обрабатывает её с использованием программных комплексов "Pangolin" [26, 27] или "Nextclade" [28], применяемых соответственно для полногеномных или фрагментных последовательностей SARS-CoV-2. Анализ и генотипирование прочих патогенов осуществляется при помощи иных программных средств, большая часть которых – собственные разработки Института.

Все получаемые в ходе эпидемиологического мониторинга на территории страны геномные

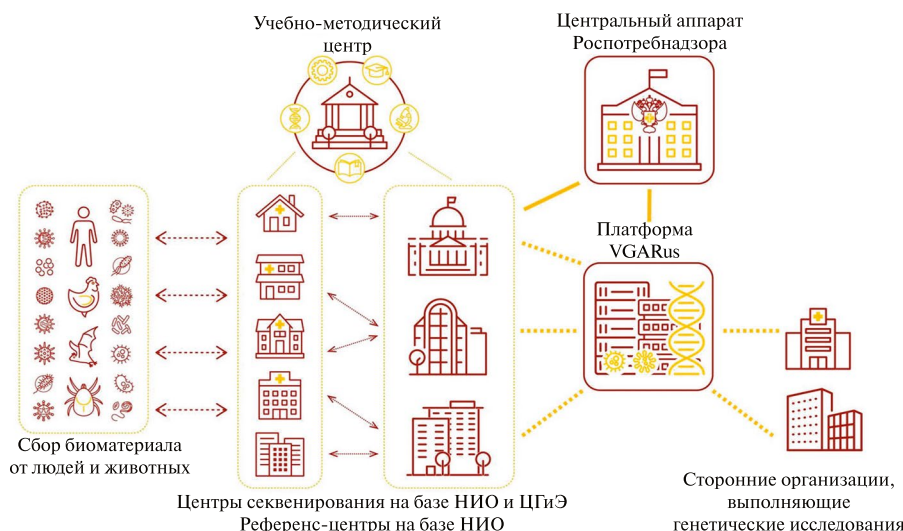


Рис. 1. VGARus – визуализация схемы взаимодействия

последовательности патогенов регистрируются в базе данных VGARus. Система поддерживает как ручную загрузку данных, так и их автоматизированную передачу посредством специализированного API (application programming interface – программный интерфейс), что упрощает добавление большого количества последовательностей одновременно. Каждому образцу, помимо нуклеотидной последовательности, соответствует определённый набор технических данных. В процессе регистрации образцу автоматически присваивается уникальный внутренний идентификатор, после чего соответствующая последовательность генома SARS-CoV-2 добавляется в его профиль. Помимо упомянутых выше сведений, в платформе VGARus также фиксируются данные об организациях, участвующих в заборе материалов и проведении лабораторных исследований, даты получения образца, его регистрации в системе и загрузки геномной последовательности, а также обезличенная информация о пациенте (пол, возраст).

В рамках работы по развитию платформы VGARus были использованы различные подходы, основанные на принципах математической статистики и машинного обучения (МО). Например, для решения проблемы генотипирования нуклеотидных последовательностей вируса гепатита В (HBV) была обучена модель градиентного бустинга, которая

показала весьма достойные результаты на тестовой выборке. Для норовируса лучшие результаты показала модель дерева решений. Общая схема подхода представлена на рисунке 2.

После загрузки заранее генотипированных полногеномных последовательностей вируса из базы данных (например, из HBVdb [29] для гепатита В), необходимо получить выравнивания для каждого генотипа. После этого посредством быстрого кодирования “one hot encoding” каждый нуклеотид в выравниваниях вырождается в последовательность из шести нулей и единиц, причём единица в них всего одна. Именно в таком формате данные поступают в модель МО. Для определения оптимальных гиперпараметров используется поиск по сетке “grid search”.

Обученные модели МО встроены во VGARus таким образом, что после загрузки в него последовательности полного генома вируса происходит её автоматическое генотипирование. Результаты для гепатита В (HBV) представлены на рисунке 3. Они хорошо соотносятся с исследованием [30] – большая часть последовательностей, характерных для России, относится к генотипу D. На текущий момент ведётся работа по внедрению данного подхода для генотипирования и других вирусных патогенов.

Математический аппарат используется во VGARus и для решения проблемы валидации даты

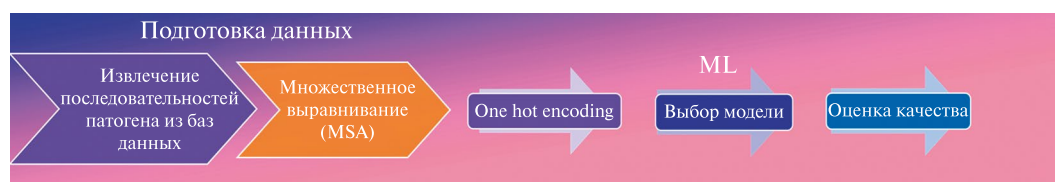


Рис. 2. Схема генотипирования полногеномных последовательностей вирусов

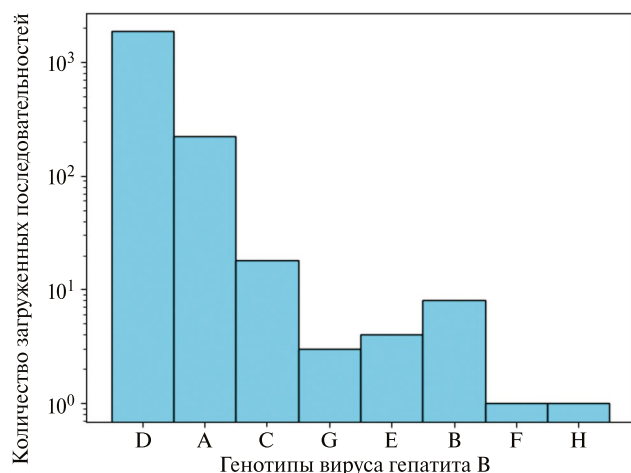


Рис. 3. Результаты генотипирования вируса гепатита В на VGARus

забора материала. При работе с большим потоком метаданных необходимо оперативно реагировать на возможные ошибки, в том числе антропогенного характера. Для оперативного детектирования подобных ошибок был внедрён валидатор, который оценивает степень достоверности указанной даты забора материала. Предварительно для каждой линии SARS-CoV-2 происходит “схлопывание” до одной из узловых линий, список которых обновляется вручную. Затем по данным с VGARus для каждой узловой линии SARS-CoV-2 формируется кривая заболеваемости, после чего производится оценка её ядерной плотности. Благодаря этому для любой даты забора по данной линии вируса удаётся получить некую меру правдоподобия, которую впоследствии можно использовать при принятии решения о валидности/невалидности. Такой подход позволяет фиксировать ошибки при указании даты забора материала, что, в свою очередь, положительно влияет на точность последующего анализа.

Таким образом, платформа VGARus стала ключевым инструментом мониторинга эпидемиологиче-

ской динамики пандемии COVID-19 на территории России и анализа её специфических особенностей. Регулярное накопление последовательностей SARS-CoV-2 на платформе способствует углублённому изучению геномного разнообразия вируса и его эволюционных процессов.

С начала пандемии COVID-19 практически весь 2020 г. наблюдалось богатое разнообразие различных линий SARS-CoV-2 [31]. Однако они не демонстрировали значительных преимуществ по сравнению друг с другом, из-за чего ни один из вариантов не становился доминирующим. В декабре 2020 г., примерно через год после начала распространения нового коронавируса по всему миру, власти Великобритании сообщили Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) об обнаружении новой линии SARS-CoV-2, названной VOC-202012/01. Линия имела многочисленные мутации в геноме и изначально была названа “британской”, однако позже была переименована в Alpha, следуя рекомендации ВОЗ избегать наименования вариантов по странам, где они впервые обнаружены. Комбинация новых мутаций влияла на способность вируса инфицировать клетки и уходить от иммунного ответа хозяина и, как следствие, позволяла ему более эффективно распространяться. Этот же вариант был обнаружен в России в конце 2020 г. и сохранялся в начале 2021 г., что совпало с резким увеличением числа новых случаев заболевания, хотя сам рост начался даже раньше, предположительно из-за сезонных факторов (рис. 4).

Вслед за выявлением варианта Alpha был зарегистрирован вариант Beta, распространённость которого в Российской Федерации оказалась существенно ниже, чем в ЮАР, где он возник изначально. Летом 2021 г. появился вариант Delta, стремительно занявший доминирующее положение и коррелировавший со значительным увеличением заболеваемости и уровня госпитализаций [32]. После периода относительно благоприятной эпидемиологической обстановки в декабре 2021 г. был обнаружен вариант

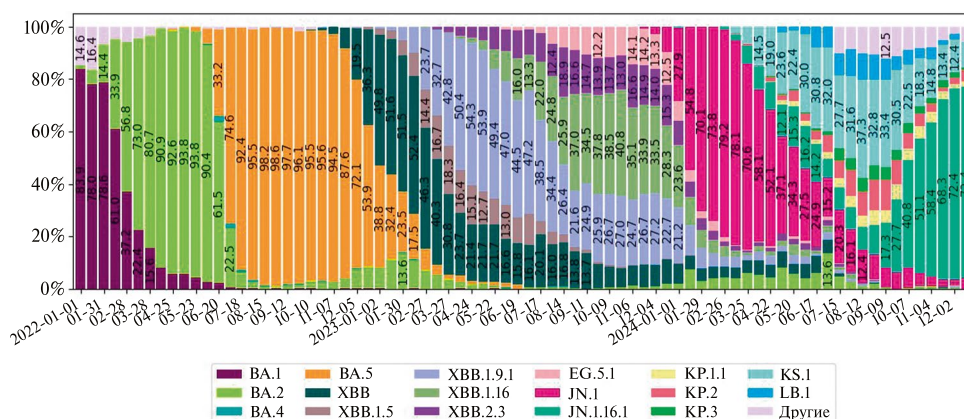


Рис. 4. Диаграмма частот встречаемости различных сублиний варианта Omicron с января 2022 г. по декабрь 2024 г.

Omicron, что привело к заметному росту заболеваемости в России. Однако уже вскоре стало наблюдаться столь же быстрое снижение показателей распространения инфекции.

Несмотря на малое количество выявляемых случаев COVID-19 весной 2022 г., появление субвариантов Omicron BA.4 и особенно BA.5 привело к росту заболеваемости, который продолжался до конца октября. В конце 2022 г. и начале 2023 г. появились высококонтагиозные варианты, такие как BQ.1*. Подобные смены доминирующих линий хорошо иллюстрируют постоянно меняющийся и сложный характер эволюции SARS-CoV-2. Примечательно, что в начале 2023 г. в популяцию вируса вернулись изменённые версии ранее существовавших линий, в частности, Omicron BA.2, представленный в виде рекомбинантных форм ХВВ*. В ноябре 2023 г. в нескольких странах, в том числе в России, начал быстро распространяться вариант коронавируса BA.2.86, неофициально названный “Pirola”. Он был примечателен большим числом мутаций в геноме по сравнению с более ранними линиями и к концу 2023 г. стал доминирующим, а в начале 2024 г. его сублиния JN.1 почти полностью доминировала в большинстве стран мира. На смену ей в конце 2024 г. пришёл рекомбинантный вариант ХЕС, доля которого постепенно стала расти во всём мире.

Описанная выше изменчивость патогена подчёркивает важность постоянного эпидемиологического мониторинга и секвенирования геномов вируса для своевременного выявления новых вариантов или изменений в структуре вирусной популяции. Оперативная идентификация таких изменений способна помочь при разработке стратегий общественного здравоохранения и при контроле распространения этих вариантов, так как смена доминирующих линий вируса может приводить к росту заболеваемости.

Разработка российской платформы агрегирования вирусных геномов VGARus стала важным аспектом в борьбе с пандемией COVID-19 в нашей стране. Эта база данных содержит более 400 000 последовательностей геномов патогенов (350 000 — геномы SARS-CoV-2), из них около 240 000 полных геномов. Она помогает выполнять множество важных функций, таких как выявление новых вариантов вирусов, значимых мутаций, создание эффективных диагностических инструментов и формирование политики в области общественного здравоохранения [33–36]. VGARus способствовала пониманию пространственной и временной динамики пандемии COVID-19. Предоставляя подробную информацию о времени и месте взятия каждого геномного образца, платформа позволяет визуализировать распределение конкретных вирусных вариантов в России и их эволюцию во времени (рис. 5). Это знание даёт важное преимущество в прогнозировании эпидемиологических тенденций на ближайшие

месяцы. Например, при использовании возможностей VGARus был предсказан рост заболеваемости COVID-19 летом 2022 г. и в начале 2023 г., связанный с появлением субвариантов Omicron BA.5 и ХВВ соответственно. Подобные прогнозы позволяют органам здравоохранения оперативно реагировать на эпидемиологическую ситуацию.

Помимо своей роли в отслеживании течения эпидемий, VGARus имеет и другое практическое значение, заключающееся в создании и оценке эффективности диагностических тестов. Так, специалисты Института регулярно используют данные VGARus для проверки эффективности праймеров и ДНК-зондов, применяемых в тестовых наборах. Платформа даёт ценную информацию для разработки и обновления структур олигонуклеотидов, используемых в диагностических тест-системах: информацию о циркулирующих в стране вариантах, о вариативности последовательности патогена в области “посадки” праймеров и зондов [37].

В настоящее время потенциал платформы VGARus выходит за рамки исследований SARS-CoV-2. Платформа расширяется для сбора данных о других патогенах, включая вирусы гепатита, гриппа, ветряной оспы, кори, бактерии из группы ESCAPE-патогенов и многие другие. Возможность работы с несколькими патогенами станет ценным инструментом для эпидемиологов, микробиологов, вирусологов и специалистов по инфекционным заболеваниям, позволит им осуществлять более качественный мониторинг распространения различных болезней и своевременно принимать меры по защите общественного здравоохранения.

В целом платформа VGARus стала заметным достижением благодаря совместным усилиям многих научных институтов Роспотребнадзора и других ведомств [33]. Её внедрение расширило наше понимание SARS-CoV-2 и внесло вклад в борьбу с пандемией COVID-19, а также подтвердило критическую важность эпидемиологического мониторинга в борьбе со вспышками инфекционных заболеваний и значимость совместных усилий в решении глобальных кризисов здравоохранения.

В начале 2025 г. к платформе VGARus было подключено 75 секвенирующих организаций различной ведомственной принадлежности. Реализована возможность загрузки последовательностей по 60 различным патогенам, и это число постоянно увеличивается. В настоящий момент на платформе представлены сведения о более чем 400 000 геномов вирусной и бактериальной природы, а пиковое значение загружаемых геномов в сутки достигло отметки в 6 000 последовательностей. Внедрены и постоянно совершенствуются новые средства автоматической проверки качества вносимых данных, которые позволяют минимизировать риски, связанные с человеческим фактором, и способствуют повышению эффективности обработки информации.

При анализе загруженных генетических последовательностей используются технологии машинного обучения, для хранения и обработки данных — современные облачные технологии. Сегодня автоматизация платформы — одна из ключевых задач геномного эпидемиологического надзора.

Расширение перечня представленных на платформе VGARus патогенов и использующих этот информационный ресурс научно-исследовательских организаций создало необходимые предпосылки для её включения отдельным модулем в федеральную государственную информационную систему сведений санитарно-эпидемиологического характера — Единую информационно-аналитическую систему Роспотребнадзора (постановление Правительства РФ от 02.12.2021 № 2178) — с целью широкого и эффективного применения полученных данных для решения научных и прикладных задач биологии и медицины.

Ещё одним важным платформенным решением, разработанным в Институте, стала SOLAR — платформа агрегирования результатов лабораторных исследований “System of laboratory aggregation results”. Она создана и внедрена с целью консолидации сведений о результатах лабораторных исследований на SARS-CoV-2 и во исполнение постановления Правительства РФ от 27.03.2021 № 452 «Об обеспечении уведомления физических лиц о результатах исследований на наличие возбудителя новой коронавирусной инфекции (COVID-19) с использованием Федеральной государственной информационной системы “Единый портал государственных и муниципальных услуг (функций)” и обмена информацией о результатах таких исследо-

ваний». Платформа SOLAR позволяет осуществлять эффективный обмен данными между различными медицинскими учреждениями и государственными органами, а также передавать информацию о проведённых исследованиях на наличие коронавирусной инфекции непосредственно на “Единый портал государственных и муниципальных услуг” (“Госуслуги”). Это помогает обеспечить доступность результатов анализа для граждан. Помимо функции передачи данных, платформа также предоставляет возможность централизованного хранения всех результатов лабораторных исследований, связанных с COVID-19, что упрощает их дальнейший анализ. С помощью SOLAR Институт получает результаты исследований на наличие возбудителя COVID-19 методом полимеразной цепной реакции, а также на наличие антител к этому вирусу. Затем эта информация передаётся в электронном виде в личные кабинеты физических лиц на портале “Госуслуги” через единую систему межведомственного электронного взаимодействия. В пик передачи данных пропускная способность системы достигала одного миллиона исследований в сутки.

В настоящее время к платформе подключено более 2 000 организаций из Российской Федерации. При этом загружено более 200 млн результатов ПЦР-исследований на COVID-19 и ИФА-исследований на антитела к SARS-CoV-2. Эти данные используются для повышения точности и информативности эпидемиологического надзора. Благодаря SOLAR медицинские организации могут передавать данные о результатах исследований на COVID-19 в информационную систему “Госуслуги” по защищённым каналам (рис. 5).



Рис. 5. SOLAR — визуализация схемы взаимодействия

В настоящее время платформа SOLAR позволяет решать следующие важные для системы эпидемиологического надзора задачи:

- проводить сбор, хранение и анализ результатов ПЦР-исследований на SARS-CoV-2 с целью определения интенсивности и динамики эпидемического процесса COVID-19 на территории всех субъектов Российской Федерации, в том числе с учётом бессимптомных форм заболевания, а также лиц, не обратившихся за медицинской помощью;
- выявлять территории и группы населения, подвергающиеся наибольшему риску заражения;
- определять особенности диагностики и учёта случаев заболевания COVID-19 в отдельных субъектах Российской Федерации;
- оценивать качество функционирования системы эпидемиологического надзора в субъектах Российской Федерации посредством оценки полноты и достоверности поступающих сведений о проявлениях эпидемического процесса;
- платформа обладает большим потенциалом для расширения перечня патогенов, в отношении которых может осуществляться сбор сведений.

Платформы SOLAR и VGARus представляют собой инновационные цифровые решения, обеспечивающие интеграцию и автоматизацию ключевых этапов взаимодействия организаций, ответственных за сбор и направление биоматериала, и центров секвенирования. Функционал платформ включает автоматизированную передачу данных, мониторинг перемещения образцов и управление информационными потоками, что способствует минимизации временных затрат и повышению точности обработки данных. Интеграция современных технологий, таких как облачные вычисления, обеспечивает высокий уровень прозрачности и безопасности на всех этапах взаимодействия, что особенно важно в условиях необходимости оперативного реагирования на эпидемические угрозы. Использование данных платформ также позволяет существенно снизить риски ошибок и повысить надёжность процессов молекулярно-генетического мониторинга в масштабах страны.

Необходимость комплексного анализа данных о развитии эпидемического процесса на территории всех регионов Российской Федерации с учётом результатов молекулярно-генетического мониторинга и ПЦР-исследований на выявление возбудителя потребовала разработки специального программного обеспечения. Этот программный продукт должен был объединять все необходимые данные, обрабатывать их математически и предоставлять широкие возможности для визуализации основных показателей. Для решения этих задач в Институте разработана и внедрена в практическую деятельность аналитическая платформа EpidSmart, обеспечившая проведение оперативного и ретроспективного анализа эпидеми-

ческой обстановки на всей территории Российской Федерации с использованием современных аналитических инструментов и результатов анализа больших данных. Уникальная особенность программного решения — агрегация в рамках единой платформы постоянно обновляемых сведений о проявлениях эпидемического процесса из отчётных форм Роспотребнадзора, результатов молекулярно-генетического мониторинга изменчивости возбудителя на основе геномов, загружаемых на платформу VGARus, а также результатов лабораторных исследований по выявлению возбудителей инфекционных болезней, загруженных на платформу SOLAR. В настоящее время в аналитическую платформу загружено более 1.7 млрд показателей о проявлениях эпидемического процесса, более 400 тыс. результатов молекулярно-генетического мониторинга и 200 млн результатов лабораторных исследований. Программное решение обеспечивает функционирование всех подсистем эпидемиологического надзора на базе единой аналитической платформы, что повышает информативность и точность анализа и прогноза эпидемической обстановки на всей территории Российской Федерации. EpidSmart обладает следующими преимуществами: предоставляет единую точку доступа к сведениям эпидемиологического характера и необходимым справочным данным; решает проблему различия форм представления данных в используемых источниках; освобождает эпидемиологов от необходимости предварительной обработки и структурирования данных; объединяет сведения из большого количества различных источников; рассчитывает статистические показатели автоматически, без участия исследователя; может делать акцент в представлении данных как на элементах визуализации, так и на табличных данных (рис. 6).

В настоящий момент аналитическая платформа EpidSmart включает в себя два модуля:

- EpidSmart — модуль COVID, обеспечивающий проведение оперативного и ретроспективного анализа по коронавирусной инфекции (COVID-19) с использованием современных аналитических инструментов, в том числе для анализа больших данных. В настоящее время в базу данных платформы загружено более 1.7 млрд показателей (рис. 7);
- EpidSmart — модуль Гепатиты, предназначенный для проведения оперативного и ретроспективного анализа эпидемиологической обстановки по вирусным гепатитам с использованием современных аналитических инструментов, в том числе для анализа больших данных. Для ретроспективного анализа доступны сведения более чем о миллионе заболевших вирусными гепатитами.

Аналитическая платформа EpidSmart позволяет решать следующие важные для системы эпидемического надзора задачи:

- осуществлять автоматизированный сбор и предварительную обработку данных, необходимых для

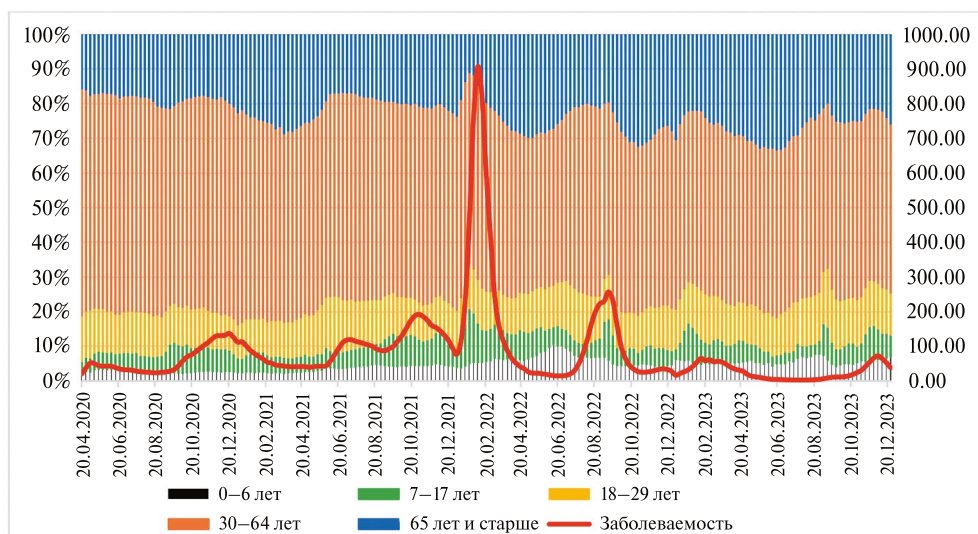


Рис. 6. Пример графического представления основных показателей эпидемического процесса на платформе EpidSmart

проведения эпидемиологического анализа, в том числе сведений о количестве и результатах ПЦР-исследований, а также о результатах молекулярно-генетического мониторинга за изменчивостью возбудителя;

- давать оперативную оценку эпидемической обстановки с выявлением категорий и территорий риска заражения, а также кратковременный прогноз уровня и динамики эпидемического процесса;
- проводить ретроспективный анализ заболеваемости, в том числе с использованием методов машинного обучения и учётом данных молекулярно-генетического мониторинга за изменчивостью возбудителя;
- осуществлять подготовку аналитических материалов, а также предварительную подготовку данных для их обработки с использованием стороннего программного обеспечения.

Аналитическая платформа EpidSmart объединяет функционирование всех подсистем санитарно-эпидемиологического надзора в единых рамках, что позволяет значительно ускорить проведение эпидемиологического анализа и повысить его информативность.

Использование математических методов анализа. Вместе с указанными программными платформенными решениями в Институте в научно-практических исследованиях широко применяются такие наборы математических методов анализа и технологий искусственного интеллекта, как параметрическая и непараметрическая статистика, современные методики регрессионного анализа временных рядов с расширенным набором статистических методов, многофакторный анализ, нелинейное сканирование, агломеративная иерархическая кластеризация, математическое моделирование популяционной

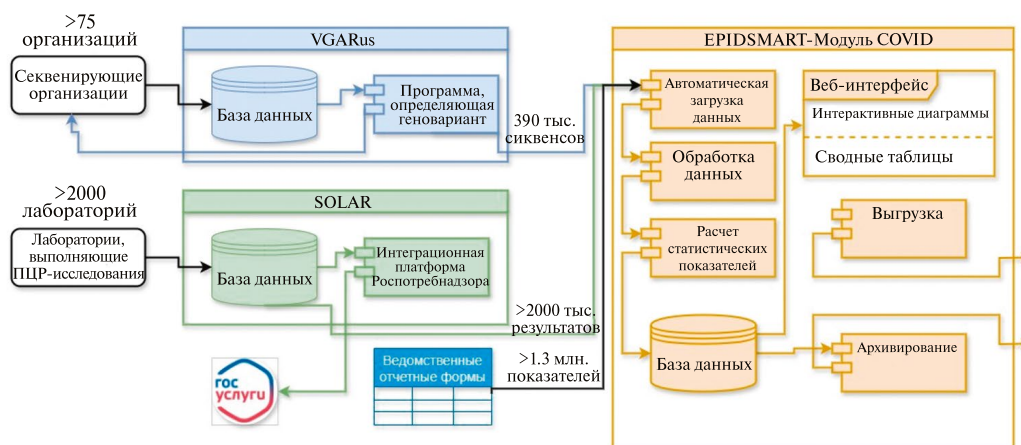


Рис. 7. Взаимодействие платформ VGARus, SOLAR и “EPIDSMART – модуль COVID”

генетики, имитационные математические модели, картографирование, набор методов машинного обучения, методики социально-экономического анализа.

Благодаря использованию указанных математических методов установлены закономерности взаимосвязи заболеваемости COVID-19 в кластерах регионов России с их социально-экономическими характеристиками [38]. С применением методов машинного обучения определены факторы риска развития средней и тяжёлой форм течения пневмонии при COVID-19. На основе математической модели SIR (Susceptible—Infected—Removed), в которой каждый из индивидуумов, входящих в исследуемую популяцию, может находиться в одном из трёх состояний: Susceptible (потенциально восприимчивый к заражению), Infected (инфицированный), Removed (выздоровевший и невосприимчивый к заражению), определено значение базового репродуктивного числа (индекс контагиозности, R_0) для циркулировавших в разные периоды эпидемии геновариантов SARS-CoV-2 [39]. Рассчитаны оценочные значения величины причинённого и предотвращённого экономического ущерба от COVID-19 для Российской Федерации в 2020–2022 гг. в зависимости от геноварианта SARS-CoV-2.

Нельзя не отметить и развитие в Институте такой составляющей цифровой трансформации эпидемиологии, как интернет вещей. К настоящему времени в Институте выполнен ряд работ по использованию интернет-запросов наиболее популярных в России поисковых систем — Яндекс и Google — для оценки динамики эпидемического процесса COVID-19 и эффективности противоэпидемических мероприятий [40–44]. Анализ изменения интернет-запросов (связанных, например, с обонянием, спросом на антибиотики, клиническими признаками заболевания COVID-19), инфодемии² и т.д., выявил, что рост интереса к определяемым ключевым словам можно рассматривать как ценный дополнительный и независимый источник данных немедицинского характера о распространении SARS-CoV-2 среди населения. Интернет-запросы как один из вариантов данных, генерируемых интернетом вещей, — достаточно простой и эффективный инструмент оценки уровня обеспокоенности общества в условиях пандемического распространения COVID-19 и имеет научно-практическое значение. Данное направление расценивается как перспективное и требует дополнительного изучения. Важно отметить, что в некоторых экономически развитых странах мира (Китай, Швейцария, Англия) интернет-запросы уже включены в официальную государственную систему сбора данных для оценки текущей эпидемической ситуации и используются для прогнозирования.

² Инфодемия — неконтролируемое распространение разнотипной, часто необоснованной информации о кризисных событиях.

Таким образом, прогнозирование динамики эпидемического процесса на современном этапе развития эпидемиологии базируется не только на использовании ретроспективных данных о показателях заболеваемости, но и на учёте характеристики популяции возбудителя, бессимптомных форм заболевания, социально-экономических особенностей регионов, на системной работе по сбору и обработке необходимых сведений при помощи современных платформенных программных решений.

Современные возможности IT-службы Института. Развитие цифровой трансформации в медицине и эпидемиологии невозможно без сочетания современного оборудования и высококвалифицированных специалистов, которые обеспечивают эффективное использование новых технологий. Информационными системами и сервисами Института ежегодно пользуется более 12 млн физических лиц и более 10 000 сотрудников различных учреждений и организаций. Разработанные и внедрённые Институтом лабораторные информационные системы обрабатывают в ежедневном режиме более 30 000 пробирок для 10 000 пациентов. Для хранения большого объёма медицинской и эпидемиологической информации используются 24 базы данных, на которые получено 87 свидетельств о государственной регистрации в Роспатенте. Кроме того, разработана 181 программа для ЭВМ, также зарегистрированных в Роспатенте. Лабораторные базы данных пополняются информацией о выполненных лабораторных исследованиях, количество записей которых ежегодно увеличивается на 20 млн строк по 1 700 различным видам исследований.

Для обеспечения непрерывной работы, развития и поддержки баз данных и программ ЭВМ Института задействовано более 100 штатных IT-специалистов: программисты и архитекторы, системные администраторы, DevOps-специалисты, тестировщики, аналитики, специалисты по информационной безопасности, специалисты по сетям. Разработка ведётся с использованием современных технологий и языков программирования, например: Go, TypeScript, PHP (Yii), Vue.js, C#. Используются лучшие мировые практики в подходах: микросервисная архитектура, виртуализация, контейнеризация (Docker и Kubernetes) и другие актуальные инструменты.

Для высоконагруженных вычислений и анализа используются три суперкомпьютера (с суммарной вычислительной мощностью 24 терафлопса), при этом суммарный объём обрабатываемой или хранящейся информации, которая размещается на собственных серверах и в облачных хранилищах, достигает 1.6 петабайт. Серверы расположены на шести собственных геораспределённых дата-центрах, что обеспечивает бесперебойную работу и высокую отказоустойчивость сервисов.

Особое внимание уделяется вопросам информационной безопасности обрабатываемых эпидемио-

логических и медицинских данных. С этой целью создано более 1 000 защищённых каналов связи (на оборудовании Института) с внешними лабораториями, организациями (в том числе в рамках постановлений Правительства). Защищённые каналы связи построены на базе сертифицированного ФСТЭК и ФСБ оборудования и программного обеспечения. Для защиты данных:

- пять информационных систем аттестованы по требованиям для ГИС (государственная информационная система) (приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17);
- пять информационных систем аттестованы по требованиям для персональных данных (приказ ФСТЭК России от 21.02.2013 № 21).

В 2023 г. Институтом получена лицензия ФСБ России на право проведения работ по обслуживанию и построению защищённых каналов связи.

* * *

Уже сегодня построенные экспертно-вычислительные системы и базы данных позволяют прогнозировать возникновение эпидемических вспышек и оценивать эффективность проведённых противоэпидемических мероприятий.

Для обеспечения биологической безопасности и предотвращения возможных пандемий необходимы: проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований, направленных на изучение генетических свойств патогенов; мониторинг известных и выявление новых возбудителей инфекционных болезней человека; совершенствование методов, возможностей и качества диагностики; создание современных вакцин; поиск генетических, эпигенетических и клеточных механизмов противодействия инфекциям. Для этого активно развивается направление по созданию инструментов цифровой трансформации и биоинформационного анализа. Ключевое требование цифровой трансформации в эпидемиологии — сочетание междисциплинарных навыков и знаний квалифицированных специалистов.

Для анализа санитарно-эпидемической обстановки, своевременного прогноза и оперативного реагирования на будущие биологические угрозы разработана уникальная научная технология, включающая триаду биобезопасности: геномный эпиднадзор, цифровая трансформация с аналитикой больших данных и мобильные технологии.

Переход с преимущественно качественного описания на количественное, формализация и обобщение данных, перевод их на электронные носители принципиально увеличили объём информации и её доступность для изучения. В результате не только расширен перечень активно используемых методов анализа, но и повышен уровень требований к его точности и качеству, а также интерпретации полу-

ченных соотношений, полностью удовлетворяющих требованиям доказательной медицины.

Ввиду того что эпидемиология изучает процессы на популяционном уровне, использование математических методов в этой области всегда имело свою специфику. С одной стороны, количественные методы анализа в эпидемиологии стали использоваться раньше и более интенсивно, чем в клинической медицине. С другой — поиск факторов риска на популяционном уровне гораздо более сложен, чем на организменном уровне. Однако при всех сложностях в настоящее время в эпидемиологии наблюдается огромный прогресс в области использования данных:

- переход от анализа обобщённой информации о заболеваемости в территориально-административных единицах к исследованию регистров — максимально подробных баз данных со списками всех случаев выявленных заболеваний;
- широкое внедрение высокопроизводительных объективных методов выявления возбудителя и его генетического анализа.

Идентификация возбудителя на основе ПЦР и других аналогичных методов позволила существенно увеличить долю “расшифрованных” спорадических и групповых случаев инфекционных заболеваний, осуществлять эпидемический надзор на генетическом уровне, заранее прогнозируя появление новых опасных вариантов патогена, а также проводить детальный анализ случаев групповых заболеваний, точно определяя пути и последовательности заражения.

Кардинальное увеличение объёма доступных данных позволило активно использовать в медицине методы искусственного интеллекта, то есть статистический анализ, в процессе которого выбор средств и настройка параметров прогнозирования происходит без явного участия человека. При этом хорошо разработанные методы оперативного и ретроспективного эпидемиологического анализа идеально подходят для решения одной из основных задач эпидемического надзора — слежения за динамикой заболеваемости инфекционными болезнями и выявления фактов эпидемического неблагополучия.

Увеличение объёма и качества собираемых данных о заболеваемости и возможных факторах риска, результаты полногеномного секвенирования, расширение набора используемых математических методов, в том числе моделирования эпидемического процесса, позволяют уточнять и расширять задачи эпидемиологического надзора, анализировать особенности взаимодействия популяций, давать прогнозы эффективности даже для новых, ранее не применявшихся противоэпидемических мероприятий.

Цифровая трансформация представляет собой ключевое направление в современной эпидемиологии, обладающее значительным потенциалом с точки зрения улучшения параметров общественного

здравоохранения. Внедрение искусственного интеллекта и методов машинного обучения в диагностику и прогнозирование заболеваемости инфекционными болезнями способствует повышению точности и скорости эпидемиологического анализа, позволяя анализировать большие объёмы данных, выявлять закономерности распространения инфекций и разрабатывать стратегии их предотвращения, что особенно актуально в условиях глобальных пандемий.

Однако прогресс в области цифровой трансформации сопряжён с рядом этических и технологических рисков. Один из наиболее тревожных аспектов — использование синтетической биологии и искусственного интеллекта для создания новых патогенных микроорганизмов [45]. Синтетическая биология предоставляет уникальные возможности для конструирования биомолекул и живых систем, но также открывает доступ к потенциально опасным исследованиям. Возможность создания высокопатогенных штаммов или резистентных к существующим методам лечения патогенов — угроза глобальной биобезопасности.

Риски использования искусственного интеллекта и синтетической биологии в неподконтрольных условиях значительно усиливаются при недостатке регулирующих механизмов. Отсутствие чётко определённых нормативных актов и этических стандартов может привести к злоупотреблению этими технологиями, что чревато серьёзными последствиями для здоровья населения планеты. В связи с этим необходима разработка комплексной системы контроля и мониторинга научных исследований в данной области с целью сохранения баланса между прогрессом и безопасностью человечества.

В современных условиях биологических угроз резко возросла значимость эпидемиологии как общемедицинской науки, показанная ещё В.Д. Беляковым: “Эпидемиология должна быть основой профилактики широкого спектра болезней, в том числе неинфекционных заболеваний, что расширяет её функции за рамки традиционного понимания. Эпидемиология является диагностической и профилактической наукой, которая анализирует закономерности возникновения и распространения патологических состояний среди населения, решая задачи общественного здоровья” [46]. Возникнув как исконно русская системная общемедицинская наука, эпидемиология постоянно эволюционирует. В современных условиях её развитие происходит благодаря цифровизации основных аналитических функций и задач эпидемического надзора, методам математического моделирования и прогнозирования развития эпидемического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишустин сообщил, что в РФ работают почти 1 млн айтишников. <https://tass.ru/ekonomika/21812873> (дата обращения 16.02.2025).

Mishustin reported that almost 1 million IT specialists work in the Russian Federation. (In Russ.)

2. Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 “О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года”. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (дата обращения 16.02.2025).

Decree of the President of the Russian Federation dated 07.05.2024 no. 309 “On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the perspective up to 2036”. (In Russ.)

3. Постановление Правительства РФ от 10.10.2020 № 1646 “О мерах по обеспечению эффективности мероприятий по использованию информационно-коммуникационных технологий в деятельности федеральных органов исполнительной власти и органов управления государственными внебюджетными фондами”. <http://government.ru/docs/all/130305/> (дата обращения 16.02.2025).

Resolution of the Government of the Russian Federation dated 10.10.2020 no. 1646 “On measures to ensure the effectiveness of information and communication technologies in the activities of federal executive bodies and state non-budgetary funds management bodies”. (In Russ.)

4. Новый нацпроект “Экономика данных” будет реализован в рамках 8 федеральных проектов. <https://ac.gov.ru/news/page/novyy-nacproekt-ekonomika-dannyh-budet-realizovan-v-ramkah-8-federalnyh-proektov-27883> (дата обращения 16.02.2025).

The new national project “Data Economy” will be implemented within the framework of 8 federal projects. (In Russ.)

5. Catlin T., Lorenz J.T., Sternfels B., Willmott P. A Roadmap for a Digital Transformation. McKinsey & Company, 2017. <https://www.mckinsey.com/industries/financialservices/our-insights/roadmap-for-a-digital-transformation> (дата обращения 25.01.2025); Digital, Technology, and Data. Boston Consulting Group, 2023. <https://www.bcg.com/en-us/digital-bcg/overview.aspx> (дата обращения 16.02.2025).

6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 29161-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Структура данных. Уникальная идентификация для интернета вещей.

State standard R ISO/IEC 29161—2019. National standard of the Russian Federation. Information technology. Data structure. Unique identification for the Internet of Things. (In Russ.)

7. Laney D. 3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity and Variety. META Group, 2001. <https://studylib.net/doc/8647594/3d-data-management-controlling-data-volume--velocity-an...> (дата обращения 16.02.2025).

8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 20546-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Большие данные. Обзор и словарь.
State standard R ISO/IEC 20546-2021. National standard of the Russian Federation. Information technology. Big data. Overview and vocabulary. (In Russ.)
9. ГОСТ ISO/IEC 17788-2016. Межгосударственный стандарт. Информационные технологии. Облачные вычисления. Общие положения и терминология.
State standard ISO/IEC 17788-2016. Interstate standard. Information technology. Cloud computing. Overview and vocabulary. (In Russ.)
10. ГОСТ 33707-2016. Межгосударственный стандарт. Информационные технологии. Словарь.
State standard 33707-2016 (ISO/IEC 2382:2015). Interstate standard. Information technologies. Vocabulary. (In Russ.)
11. Аксёнова Л.Е., Аксёнов К.Д., Козина Е.В., Мясникова В.В. Разработка и тестирование автоматизированной системы анализа ОКТ изображений сетчатки // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. 2023. № 2. С. 169–176.
Aksenova L.E., Aksenov K.D., Kozina E.V., Myasnikova V.V. Automated System for Analysis of OCT Retina Images Development and Testing // *Doklady Mathematics*. 2024, vol. 108, pp. 310–316.
12. *Bekkouch I.E.I. et al.* Multi-landmark environment analysis with reinforcement learning for pelvic abnormality detection and quantification // *Medical Image Analysis*. 2022, vol. 78, 102417.
13. *Zakaria R., Abdelmajid H., Dya Z., Hakim A.* PelviNet: A Collaborative Multi-agent Convolutional Network for Enhanced Pelvic Image Registration // *J Imaging Inform. Med.* 2024, vol. 38, pp. 957–966. DOI: 10.1007/s10278-024-01249-w
14. Акимкин В.Г., Семененко Т.А., Хафизов К.Ф. и др. Стратегия геномного эпидемиологического надзора. Проблемы и перспективы // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2024. № 2. С. 163–172.
Akimkin V.G., Semenenko T.A., Khafizov K.F. et al. Genomic surveillance strategy. Problems and perspectives // *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2024, no. 2, pp. 163–172. (In Russ.)
15. Акимкин В.Г., Хафизов К.Ф., Дубоделов Д.В. и др. Молекулярно-генетический мониторинг и технологии цифровой трансформации в современной эпидемиологии // Вестник РАМН. 2023. № 4. С. 363–369.
Akimkin V.G., Khafizov K.F., Dubodelov D.V. et al. Molecular genetic monitoring and digital transformation technologies in modern epidemiology // *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2023, no. 4, pp. 363–369. (In Russ.)
16. Котов И.А., Аглетдинов М.Р., Роев Г.В. и др. Геномный надзор за SARS-CoV-2 в Российской Федерации: возможности платформы VGARus // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2024. № 4. С. 435–447.
Kotov I.A., Agletdinov M.R., Rojev G.V. et al. Genomic surveillance of SARS-CoV-2 in Russia: insights from the VGARus platform // *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2024, no. 4, pp. 435–447. (In Russ.)
17. Лаштабега Е.А., Лиманова Н.И., Козлов В.В. Методы повышения эффективности и производительности вычислительных систем на основе технологий искусственного интеллекта // Бюллетень науки и практики. 2024. № 7. С. 392–396.
Lashtabega E.A., Limanova N.I., Kozlov V.V. Methods for improving the efficiency and performance of computing systems based on artificial intelligence technologies // *Bulletin of Science and Practice*. 2024, no. 7, pp. 392–396. (In Russ.)
18. Акимкин В.Г., Семененко Т.А., Хафизов К.Ф. и др. Биобезопасность и геномный эпидемиологический надзор // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. 2024. № 5. С. 4–12.
Akimkin V.G., Semenenko T.A., Khafizov K.F. et al. Biosafety and genomic epidemiological surveillance // *Epidemiology and vaccine prevention*. 2024, no. 5, pp. 4–12. (In Russ.)
19. Беляков В.Д. Общие закономерности функционирования паразитарных систем (механизмы саморегуляции) // Паразитология. 1986. № 4. С. 249–255.
Belyakov V.D. General patterns of the functioning of parasitic systems (the mechanisms of self-regulation) // *Parazitologiya*. 1986, no. 4, pp. 249–255. (In Russ.)
20. Громашевский Л.В. Общая эпидемиология: руководство для врачей и студентов. 4-е изд. М.: Медицина, 1965.
Gromashevsky L.V. General Epidemiology: a guide for doctors and students. 4th ed. Moscow: Medicine, 1965. (In Russ.)
21. Черкасский Б.Л. Руководство по общей эпидемиологии. М.: Медицина, 2001.
Cherkassky B.L. Handbook of General Epidemiology. Moscow: Medicine, 2001. (In Russ.)
22. *Zhang S., Diao M., Yu W. et al.* Estimation of the reproductive number of Novel Coronavirus (COVID-19) and the probable outbreak size on the Diamond Princess cruise ship: A data-driven analysis // *Int. J. Infect. Dis.* 2020, vol. 93, pp. 201–204.
23. *Anderson R.M. et al.* How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic? // *The Lancet*. 2020, no. 10228, pp. 931–934.
24. *Lee D., Heo K., Seo Y. et al.* Flattening the Curve on COVID-19: South Korea's Measures in Tackling

- Initial Outbreak of Coronavirus // *Am. J. Epidemiol.* 2021, vol. 190 (4), pp. 496–505.
25. Hill V., Githinji G., Vogels C.B.F. et al. Toward a global virus genomic surveillance network // *Cell Host & Microbe*. 2023, vol. 31 (6), pp. 861–73.
 26. Rambaut A., Holmes E.C., O'Toole Á. et al. A dynamic nomenclature proposal for SARS-CoV-2 lineages to assist genomic epidemiology // *Nat. Microbiol.* 2020, no. 5 (11), pp. 1403–1407.
 27. O'Toole Á., Scher E., Underwood A. et al. Assignment of epidemiological lineages in an emerging pandemic using the pangolin tool // *Virus. Evol.* 2021, vol. 7 (2), veab064.
 28. Aksamentov I., Roemer C., Hodcroft E.B., Neher R.A. Nextclade: clade assignment, mutation calling and quality control for viral genomes // *Journal of Open Source Software*. 2021, no. 6 (67), 3773.
 29. Hayer J. et al. HBVdb: a knowledge database for Hepatitis B Virus // *Nucleic acids research*. 2013, vol. 41, pp. D566–D570.
 30. Velkov, S., Ott J., Protzer U., Michler T. The global hepatitis B virus genotype distribution approximated from available genotyping data // *Genes*. 2018, vol. 9, p. 495.
 31. Komissarov A.B., Safina K.R., Garushyants S.K. et al. Genomic epidemiology of the early stages of the SARS-CoV-2 out-break in Russia // *Nat. Commun.* 2021, vol. 12 (1), p. 649.
 32. Борисова Н.И., Котов И.А., Колесников А.А. и др. Мониторинг распространения вариантов SARS-CoV-2 (Coronaviridae: Coronavirinae: Betacoronavirus; Sarbecovirus) на территории Московского региона с помощью таргетного высокопроизводительного секвенирования // *Вопросы вирусологии*. 2021. Т. 66 (4). С. 269–278.
Borisova N.I., Kotov I.A., Kolesnikov A.A. et al. Monitoring the spread of the SARS-CoV-2 variants (Coronaviridae: Coronavirinae: Betacoronavirus; Sarbecovirus) in the Moscow region using targeted high-throughput sequencing // *Problems of Virology*. 2021, vol. 66 (4), pp. 269–278. (In Russ.)
 33. Akimkin V.G., Semenenko T.A., Ugleva S.V. et al. COVID-19 epidemic process and evolution of SARS-CoV-2 genetic variants in the Russian Federation // *Microbiol. Res.* 2024, vol. 15 (1), pp. 213–224.
 34. Акимкин В.Г., Попова А.Ю., Плоскирева А.А. и др. COVID-19: эволюция пандемии в России. Сообщение I: проявления эпидемического процесса COVID-19 // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2022. Т. 99 (3). С. 269–286.
Akimkin V.G., Popova A.Yu., Ploskireva A.A. et al. COVID-19: the evolution of the pandemic in Russia. Report I: manifestations of the COVID-19 epidemic process // *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2022, vol. 99 (3), pp. 269–286. (In Russ.)
 35. Акимкин В.Г., Попова А.Ю., Хафизов К.Ф. и др. COVID-19: эволюция пандемии в России. Сообщение II: динамика циркуляции геновариантов вируса SARS-CoV-2 // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2022. Т. 99 (4). С. 381–396.
Akimkin V.G., Popova A.Yu., Khafizov K.F. et al. COVID-19: the evolution of the pandemic in Russia. Report II: dynamics of the circulation of SARS-CoV-2 genetic variants // *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2022, vol. 99 (4), pp. 381–396. (In Russ.)
 36. Акимкин В.Г., Семененко Т.А., Хафизов К.Ф. и др. Стратегия геномного эпидемиологического надзора. Проблемы и перспективы // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2024. Т. 101 (2). С. 163–172.
Akimkin V.G., Semenenko T.A., Khafizov K.F. et al. Strategy of genomic epidemiological surveillance. Problems and perspectives // *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2024, vol. 101 (2), pp. 163–172. (In Russ.)
 37. Kotov I., Saenko V., Borisova N. et al. Effective approaches to study the genetic variability of SARS-CoV-2 // *Viruses*. 2022, vol. 14 (9), 1855.
 38. Сенько О.В., Кузнецова А.В., Воронин Е.М. и др. Методы интеллектуального анализа данных в исследованиях эпидемии COVID-19 // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*. 2022. № 1. С 83–96.
Senko O.V., Kuznetsova A.V., Voronin E.M. et al. Methods of intellectual data analysis in COVID-19 research // *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*. 2022, no. 1, pp. 83–96. (In Russ.)
 39. Герасимов А.Н., Воронин Е.М., Мельниченко Ю.Р. и др. Методика оценки базового репродуктивного числа актуальных вариантов вируса SARS-CoV-2 // *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2024. Т. 23 (4). С. 12–22.
Gerasimov A.N., Voronin E.M., Melnichenko Yu.R. et al. Methodology for Estimating the Basic Reproductive Number of Current Variants of the Virus SARS-CoV-2 // *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2024, vol. 23 (4), pp. 12–22. (In Russ.)
 40. Хорошун Д.К., Момыналиев К.Т., Воронин Е.М., Акимкин В.Г. Анализ поисковых запросов в “Яндексе”, связанных с COVID-19 в Российской Федерации // *Медицинский алфавит*. 2022. № 14. С. 14–22.
Khoroshun D.K., Momynaliev K.T., Voronin E.M., Akimkin V.G. Analysis of search queries in Yandex related to COVID-19 in the Russian Federation // *Medical alphabet*. 2022, no. 14, pp. 14–22. (In Russ.)
 41. Акимкин В.Г., Тутельян А.В., Шулакова Н.И., Воронин Е.М. Пандемия COVID-19: новый виток нарастания антибиотикорезистентности // *Инфекционные болезни*. 2021. Т. 19 (3). С. 133–138.

- Akimkin V.G., Tutelyan A.V., Shulakova N.I., Voronin E.M.* COVID-19 pandemic: a new round of increasing antibiotic resistance // *Infectious diseases*. 2021, vol. 19 (3), pp. 133–138. (In Russ.)
42. *Momynaliev K.T., Khoroshun D.K., Akimkin V.G.* Online queries as a criterion for evaluating epidemiological status and effectiveness of COVID-19 control measures in Russia: results from Yandex. Wordstat analysis // *BMJ Open*. 2022, vol. 12, e056716.
43. *Момыналиев К.Т., Хорошун Д.К., Акимкин В.Г.* Интернет-запросы, связанные с обонянием, как маркер оценки эпидемической ситуации в связи с коронавирусом SARS-COV2 // *Эпидемиология и инфекционные болезни*. 2021. № 2. С. 42–48.
Momynaliev K.T., Khoroshun D.K., Akimkin V.G. Olfaction-related Internet queries as a marker for assessing the epidemic SARS-COV2 situation // *Epidemiology and infectious diseases*. 2021, no. 2, pp. 42–48. (In Russ.)
44. *Момыналиев К.Т., Хонерская Л.Л., Пишеничная Н.Ю. и др.* Инфодемологическое исследование эпидемии коронавируса с использованием Google Trends в странах Центральной Азии – Казахстане, Киргизии, Узбекистане, Таджикистане // *Медицинский алфавит*. 2020. Т. 34. С. 47–53.
Momynaliev K.T., Khoperskaya L.L., Pshenichnaya N.Yu. et al. Infodemiological study of coronavirus epidemic using Google Trends in Central Asian Republics of Kazakhstan, Kyrgyzstan, Uzbekistan, Tajikistan // *Medical alphabet*. 2020, vol. 34, pp. 47–53. (In Russ.)
45. *Pannu J. et al.* AI could pose pandemic-scale biosecurity risks. Here's how to make it safer // *Nature*. 2024, no. 8040, pp. 808–811.
46. *Беляков В.Д., Яфаев Р.Х.* Эпидемиология: учебник. М.: Медицина, 1989.
Belyakov V.D., Yafaev R.Kh. Epidemiology: textbook. Moscow: Medicine, 1989. (In Russ.)

PROSPECTS OF DIGITALIZATION IN EPIDEMIOLOGY

V.G. Akimkin^{a,*}

^a*Central Research Institute of Epidemiology, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: vgakimkin@yandex.ru*

Digital transformation is a key area in modern epidemiology, with significant potential for improving public health parameters. The implementation of artificial intelligence and machine learning methods in the processes of diagnosing and predicting the incidence of infectious diseases increases the accuracy and speed of epidemiological analysis, allows processing large volumes of data, identifying patterns in the spread of infections and developing strategies to prevent them.

The article reviews three software platforms developed at the Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor for the implementation of epidemiological monitoring of coronavirus infection and other infectious diseases.

The VGARus platform has become a key tool for monitoring the dynamics of the COVID-19 pandemic in Russia. The platform's potential goes beyond SARS-CoV-2 research: it is expanding to collect data on other pathogens.

The SOLAR platform consolidates information on laboratory results for SARS-CoV-2 and allows for effective data exchange between various medical institutions and government agencies, as well as the transfer of information on the conducted tests directly to the State Services portal in the personal accounts of individuals. SOLAR provides centralised storage of all COVID-19-related laboratory results, facilitating their further review.

Another project of the Institute, the EpidSmart analytical platform, solves the task of comprehensive analysis of data on the development of the epidemic process in Russia with the identification of categories and territories of infection risk.

Keywords: epidemiological surveillance of infectious diseases, digital transformation of the state, COVID-19 pandemic, epidemiological monitoring, virus genome sequencing, VGARus platform, SOLAR platform, Internet of Things, EpidSmart analytical platform, mathematical methods of analysis, artificial intelligence technologies.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В МЕДИЦИНЕ: ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

© 2025 г. А.И. Аветисян^{а,*}

^аИнститут системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,
Москва, Россия

*E-mail: arut@ispras.ru

Поступила в редакцию 23.04.2025 г.

После доработки 23.04.2025 г.

Принята к публикации 19.05.2025 г.

В статье рассматриваются современные вызовы и возможности применения искусственного интеллекта (ИИ) в медицине. Представлена Платформа для создания моделей интеллектуального анализа биомедицинских данных, разработанная в рамках Научного центра мирового уровня “Цифровой биодизайн и персонализированное здравоохранение”. Описаны ключевые аспекты инфраструктуры, необходимой для обработки медицинских данных, а также результаты апробации Платформы на реальных биомедицинских задачах. Особое внимание уделено применению ИИ для анализа электрокардиограмм (ЭКГ), классификации маммограмм, детекции меланом и решения задач биоинформатики. Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на заседании Президиума РАН 24 декабря 2024 г.

Ключевые слова: искусственный интеллект, биомедицинские данные, машинное обучение, анализ данных, федеративное обучение.

DOI: 10.31857/S0869587325080053, **EDN:** DTGCAN

Современная медицина генерирует огромные массивы данных — от электронных медицинских карт и геномных анализов до показателей с персональных носимых устройств. Это позволяет решать задачи в области скрининга и диагностики различных заболеваний с применением искусственного интеллекта (ИИ). Тренд на его внедрение в здравоохранение носит общемировой характер. Так, по данным компании Marketsand Markets, объём глобального рынка ИИ в здравоохранении в 2024 г. составил 4.92 млрд долл., а к 2030 г., согласно прогно-

зам, вырастет до 164.16 млрд [1]. Рост числа научных исследований также свидетельствует о значительном интересе к этой области. За последние 10 лет число публикаций о применении ИИ в медицине на портале PubMed увеличилось более чем в 10 раз: с 1689 в 2014 г. до 18264 в 2024 г.

Вместе с тем внедрение ИИ в медицину сопряжено с рядом проблем. В их числе: создание инфраструктуры для сбора и хранения данных (изображения, тексты, сигналы и видео); наличие масштабируемых вычислительных ресурсов; подготовка квалифицированных врачей-экспертов; непрерывная работа с моделями машинного обучения и многое другое. Необходимы также доверенные решения, отвечающие Национальной стратегии развития ИИ на период до 2030 года [2]. В документе подчёркивается, что это технологии, “отвечающие стандартам безопасности, разработанные с учётом принципов объективности, недискриминации, этичности, исключающие при их использовании возможность причинения вреда человеку и нарушения его основополагающих прав и свобод, нанесения ущерба интересам общества и государства”.

Для ответа на эти вызовы в ИСП РАН на основе открытого и отечественного программного обеспе-



АВETИСЯН Арутюн Ишханович — академик РАН, директор ИСП РАН.

чения (ПО) разработана Платформа анализа биомедицинских данных. Она создана в рамках Научного центра мирового уровня (НЦМУ) “Цифровой биодизайн и персонализированное здравоохранение” совместно с Сеченовским Университетом, НИИ биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича, Новгородским государственным университетом и Институтом конструкторско-технологической информатики РАН. Платформа опирается на ряд базовых решений, разрабатываемых в ИСП РАН. Это облачные технологии, технологии доверенного ИИ, система аннотирования данных Colba и другие.

Платформа состоит из двух сегментов: исследовательского (“фабрика моделей машинного обучения”) и продуктового (“витрина моделей машинного обучения”). Исследовательский сегмент выступает в качестве основной производственной среды для создания моделей ИИ и включает следующие компоненты:

- подсистема API и пользовательского web-портала объединяет модули исследования данных, управления проектами и вычислительными ресурсами, обучения моделей, защиты информации и др.;
- слой оркестрации — используется оркестратор Michman, разработанный в ИСП РАН. Это оркестратор сервисов уровня PaaS (Platform as a Service) для хранения и анализа больших данных, задач машинного обучения, инструментов управления нагрузкой. Инструмент позволяет автоматически создавать и конфигурировать распределённые кластеры в облачной среде с учётом пользовательских требований и настроек;
- слой виртуализации — используется облачная среда Asperitas, разработанная в ИСП РАН на основе открытых технологий Openstack и Ceph для ресурсоёмких вычислений и хранения данных.

Продуктовый сегмент объединяет клиентский web-портал, балансировщик нагрузки, набор готовых моделей и инфраструктурные подсистемы (управление моделями, мониторинг ресурсов, защита информации и др.), которые также работают на основе Michman и Asperitas.

Таким образом, платформа реализует комплексный подход к созданию и управлению моделями ИИ, объединяя в единую экосистему инструменты для проведения исследований, вычислительную инфраструктуру, подсистемы управления данными и программные интерфейсы для эксплуатации моделей. Архитектура платформы поддерживает полный жизненный цикл моделей — от сбора и разметки сырых данных до создания и внедрения прикладных сервисов на основе нейросетевых моделей.

К настоящему моменту платформа апробирована на примере решения ряда биомедицинских задач. Во всех случаях были задействованы основные компоненты платформы: с их помощью осуществляется хранение и аннотирование данных, обучение моде-

лей и создание прототипов прикладных сервисов. В числе наиболее значимых реализаций — создание модели ИИ для классификации ЭКГ. Развитие научной основы данного направления началось ещё в 2020 г. с совместных работ с Российско-Армянским (Славянским) Университетом и Израильским технологическим институтом Технион, в рамках гранта РФФИ [3–6]. Позже на основе данных более 1.5 млн цифровых ЭКГ из разных регионов (Республика Татарстан, Москва и Великий Новгород) была разработана система аннотирования ЭКГ, обучена модель нейросетевой классификации ЭКГ ИСП РАН, позволяющая классифицировать 11 синдромов с высокими показателями чувствительности и специфичности. В частности, для фибрилляции предсердий чувствительность модели составляет 0.969, а специфичность — 0.966 (табл. 1).

Сервис на основе модели ИИ для классификации 12-канальных ЭКГ успешно прошёл клинические испытания в ФГБУ “НМИЦ им. В.А. Алмазова” Минздрава России, и в декабре 2024 г. “Диагностическое ПО для нейросетевого анализа ЭКГ ИСП РАН по ТУ ЦРПМ.50050-01 98 01” было зарегистрировано в Росздравнадзоре как медицинское изделие 3 класса риска, к которому относятся высокотехнологичные устройства для диагностики и хирургии, а также программы, использующие алгоритмы ИИ (регистрационный номер медицинского изделия РЗН 2024/24366). В этом же году ИСП РАН совместно с Сеченовским университетом и компанией “Яндекс” впервые в России провёл эксперимент по обучению модели классификации 12-канальных ЭКГ с использованием алгоритмов федеративного машинного обучения. В результате была создана нейросеть, которая по данным цифровых ЭКГ выявляет фибрилляцию предсердий — одну из наиболее распространённых патологий сердца, причём делает это с высокими показателями чувствительности и специфичности. Для обучения использовались два независимых набора данных с аннотированными ЭКГ: первый — от Сеченовского Университета, второй — открытый набор данных РТВ-XL. После нескольких раундов обучения результаты были переданы в общий контур. За техническую составляющую проекта отвечали инженеры Yandex Cloud и ИСП РАН. В Yandex Cloud просчитали этапы реализации, необходимый объём ресурсов и предложили стек технологий. В ИСП РАН разработали нейросетевую модель классификации, адаптировали её под открытый фреймворк федеративного обучения, а также настроили среду для обучения. Сеченовский университет предоставил набор данных и дал экспертную оценку качества модели.

В 2024 г. результаты проведённых в ИСП РАН исследований в области цифровой медицины были объединены комплекс моделей, методов и алгоритмов искусственного интеллекта с приложением

Таблица 1. Показатели чувствительности и специфичности для 11 синдромов

Синдром	Чувствительность	Специфичность
АВ-блокада 1-ой степени	0.923	0.890
Желудочковая экстрасистолия	0.930	0.936
Наджелудочковая экстрасистолия	0.930	0.871
Неполная блокада правой ножки пучка Гиса	0.890	0.870
Отклонение электрической оси влево	0.940	0.870
Отклонение электрической оси вправо	0.946	0.925
Полная блокада левой ножки пучка Гиса	0.970	0.900
Полная блокада правой ножки пучка Гиса	0.980	0.960
Синусовая брадикардия	0.970	0.890
Синусовая тахикардия	0.939	0.898
Фибрилляция предсердий	0.969	0.966

к медицинским задачам; этот результат включён РАН в число ключевых научных достижений российских учёных.

В настоящее время в институте активно развивается анализ одноканальных ЭКГ. Для получения таких ЭКГ необязательно использовать кардиограф — сбор данных осуществляется с помощью смарт-часов или других устройств. Результаты исследований и разработок в области применения ИИ для анализа одноканальных ЭКГ были представлены на первом Международном семинаре по цифровой кардиологии в рамках конференции COMPSAC в Осаке (DICAR 2024: The 1st IEEE International Workshop on Digital Cardiology) [7]. В 2025 г. в ИСП РАН начинается реализация проекта по сбору и анализу одноканальных и 12-канальных ЭКГ как с носимых устройств (смарт-часы), так и с медицинских (кардиографы). Его цели включают:

- создание единой системы для сбора, хранения и анализа данных одноканальных и 12-канальных ЭКГ на базе Платформы НЦМУ;
- разработка методов анализа одноканальных ЭКГ для выявления патологий сердечно-сосудистой системы, включая раннюю диагностику и прогнозирование;
- интеграция данных из различных источников (носимых устройств и медицинских приборов) для повышения точности диагностики и мониторинга состояния пациентов;
- создание верифицированных наборов данных ЭКГ с аннотациями для обучения и тестирования алгоритмов машинного обучения.

Партнёрами проекта выступают Сеченовский Университет, РУДН и НИИ кардиологии Томского НИМЦ. В результатах проекта заинтересована также японская компания, занимающаяся производством смарт-часов. Её цель совпадает с одной из

задач проекта: это массовый скрининг населения с целью выявления заболеваний сердечно-сосудистой системы на максимально ранних стадиях.

В ближайшем будущем планируется ряд проектов по анализу ЭКГ. Во-первых, это проведение исследований по теме «Методы подготовки медицинских данных для обучения и валидации интеллектуальных агентов “Умной клиники”» совместно с ФГБУ “НМИЦ им. В. А. Алмазова” Минздрава России (в рамках работы Исследовательского центра доверенного ИИ ИСП РАН третьей волны). Полученные результаты будут использованы при разработке комплекса ИИ-решений, направленных на повышение эффективности системы здравоохранения и создание многопрофильного медицинского ИИ-помощника для экосистемы ПАО «Сбербанк России». Во-вторых, это разработка программного продукта для автоматического определения фракционного резерва кровотока и характеристик атеросклеротической бляшки по данным компьютерной томографии у пациентов с выявленной ишемической болезнью сердца совместно с РЭУ им. Г.В. Плеханова и ФГБУ “НМИЦ кардиологии им. ак. Е.И. Чазова” Минздрава России. Ожидаемым эффектом от внедрения программного продукта станет, в частности, снижение числа инфарктов миокарда и уровня смертности от ишемической болезни сердца без увеличения количества инвазивных диагностических процедур.

Ещё один пример апробации платформы на примере решения прикладной задачи — создание Melanoscope AI, системы раннего обнаружения меланомы и других злокачественных новообразований кожи на основе анализа дерматоскопических изображений. Система разрабатывается междисциплинарной командой медиков и программистов и объединяет несколько модулей: сбор дерматоскопических изображений, обучение моделей ИИ,

классификация изображений и др. Melanoscope AI осуществляет предобработку изображения, локализацию объекта, извлечение признаков и обучение модели ИИ, а также классификацию дерматоскопического изображения. Ключевые особенности системы — высокая точность определения диагноза (>90%) и обширная база клинических случаев для обучения нейросетевых моделей (>35 000).

Развивается совместный проект Центра ИИ на базе НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина и Исследовательского центра доверенного ИИ ИСП РАН по созданию моделей для классификации маммограмм с применением глубоких нейронных сетей. Уже разработан прототип системы для классификации маммограмм с использованием глубокого обучения. Модель достигла высоких показателей чувствительности (0.8333) и специфичности (0.8228), что в среднесрочной перспективе должно позволить создать программное решение для ранней диагностики рака молочной железы [8, 9].

Ещё одна группа проектов связана с применением ИИ в биоинформатике. Это проекты по созданию масштабируемых платформенных сервисов анализа данных секвенирования ДНК и РНК и разработке алгоритмов анализа генетических последовательностей. Партнёрами исследований выступают Сеченовский университет, МФТИ, ИОГен РАН, РУДН и другие организации. Исследования охватывают широкий ряд тем — от анализа данных полногеномного секвенирования до создания масштабируемого конвейера поиска химерных генов. Научные статьи, отражающие результаты проведённой работы, опубликованы в журналах Q1 [10–12] и активно цитируются.

В заключение необходимо отметить, что продуманное внедрение ИИ в медицину способно кардинально улучшить качество медицинской помощи: пациенты получают более точную диагностику и персонализированное лечение, врачи — интеллектуальные системы поддержки решений, а здравоохранение в целом — оптимизацию ресурсов и эффективные инструменты прогнозирования, что в конечном итоге повысит уровень здоровья населения.

Искусственный интеллект — это не замена специалиста, а мощный инструмент, усиливающий экспертизу и повышающий производительность труда врача. Для успешного развития и внедрения технологий интеллектуального анализа данных в медицине необходимы:

- качественные наборы достоверных и постоянно обновляющихся биомедицинских данных, учитывающие появление новых препаратов, методов и оборудования;
- непрерывная работа с моделями машинного обучения, которые требуют постоянного обновления и доработки, чтобы оставаться актуальными

и эффективными (например, при появлении новых производителей устройств — источников данных);

- инфраструктура для сбора, упорядоченного хранения и обработки данных, а также для создания моделей машинного обучения, которая объединяет все необходимые технологии, предоставляет сервисы, адаптируемые под конкретную задачу, а также учитывает требования к хранению конфиденциальных данных;
- междисциплинарная команда профильных врачей-экспертов, которые смогут обеспечить высокое качество аннотирования данных и высокий уровень межэкспертного согласия, и высококвалифицированных ИТ-специалистов, которые совместно с медиками организуют сбор и разметку данных, а также оценку модели.

Всё это позволит значительно улучшить диагностику многих социально значимых заболеваний, обеспечить их эффективную профилактику и своевременное лечение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Artificial Intelligence (AI) in Healthcare Market: Growth, Size, Share, and Trends. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/artificial-intelligence-healthcare-market-54679303.html>
2. Национальная стратегия развития ИИ на период до 2030 года. <https://ai.gov.ru/national-strategy/> National AI Development Strategy for the Period up to 2030.
3. Andreev P., Ananov V., Avetisyan A. et al. Non-architectural improvements for ECG classification using deep neural network // 2020 Ivannikov ISP RAS Open Conference. Pp. 64–68.
4. Gliner V., Keidar N., Makarov V. et al. Automatic classification of healthy and disease conditions from images or digital standard 12-lead electrocardiograms // Scientific Reports 10, article number: 16331 (2020), pp. 1–13.
5. Ananov V., Skorik S., Shaklein V. et al. Assessment of the impact of non-architectural changes in the predictive model on the quality of ECG classification // Proceedings of the Institute for System Programming of RAS. 2021, no. 33 (4), pp. 87–98.
6. Avetisyan A., Tigranyan Sh., Asatryan A. et al. Deep neural networks generalization and fine-tuning for 12-lead ECG classification // Biomedical Signal Processing and Control, 2024, vol. 93, 106160.
7. Skorik S., Avetisyan A., Diatlinko E. et al. Transferring Knowledge from 12-lead to 1-lead ECGs via Contrastive Learning // 2024 IEEE 48th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC). Pp. 1825–1830.
8. Ибрагимов А.А., Сенотрусова С.А., Литвинов А.А. и др. Классификация наличия злокачественных

- образований на маммограмме с помощью методов глубокого обучения // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5. № S1. С. 137–139.
- Ibragimov A.A., Senotrusova S.A., Litvinov A.A. et al.* Classification of the presence of malignant tumors on a mammogram using deep learning methods // Digital Diagnostics. 2024, vol. 5, no. S1, pp. 137–139.
9. *Ibragimov A., Senotrusova S., Litvinov A. et al.* MamT4: Multi-View Attention Networks for Mammography Cancer Classification // 2024 IEEE 48th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC). Pp. 1965–1970.
 10. *Guguchkin E., Kasianov A., Belenikin M. et al.* Enhancing SNV identification in whole-genome sequencing data through the incorporation of known genetic variants into the minimap2 index // BMC Bioinformatics, 2024 Jul, 13:25(1):238.
 11. *Vishnyakova P., Poltavets A., Karpulevich E. et al.* The response of two polar monocyte subsets to inflammation // Biomedicine and Pharmacotherapy, 2021, Jul. 139:111614.
 12. *Sorokin M., Lyadov V., Suntsova M. et al.* Detection of fusion events by RNA sequencing in FFPE versus freshly frozen colorectal cancer tissue samples // Frontiers in molecular biosciences, 2025, Jan. 21:11:1448792.

INTELLIGENT DATA MINING IN MEDICINE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

A.I. Avetisyan^{a,*}

^a*V.P. Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: arut@ispras.ru*

The article discusses modern challenges and opportunities for using artificial intelligence (AI) in medicine. It presents a Platform for creating models of intelligent analysis of biomedical data, developed within the framework of the world-class Scientific Center “Digital Biodesign and Personalized Healthcare”. The key aspects of the infrastructure required for processing medical data, as well as the results of testing the Platform on real biomedical problems are described. Particular attention is paid to the use of AI for analyzing electrocardiograms (ECG), classifying mammograms, detecting melanomas and solving bioinformatics problems. The article is based on the report at the meeting of the Presidium of the Russian Academy of Sciences on December 24, 2024.

Keywords: artificial intelligence, biomedical data, machine learning, data analysis, federated learning.

ЦЕНТРЫ МИГРАЦИОННОЙ СИЛЫ В МИРОВОЙ ПОЛИТИКЕ

© 2025 г. И.П. Цапенко^{a,*}, К.А. Субхангулова^{a,**}

^aНациональный исследовательский институт мировой экономики и международных отношений
им. Е.М. Примакова РАН, Москва, Россия

*E-mail: tsapenko@bk.ru

**E-mail: ksubkhangulova@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.2025 г.

После доработки 19.05.2025 г.

Принята к публикации 26.05.2025 г.

В формирующейся полицентричной и многоуровневой архитектуре мироустройства в дополнение к опорной системе центров силы в их классическом понимании выстраиваются новые силовые подсистемы, в частности миграционная. Центры миграционной силы можно определить как международных акторов, преимущественно крупных участников миграционных процессов, которые способны с помощью миграционного инструментария добиваться внешнеполитических целей и при конкретных условиях реализуют этот потенциал. Различие миграционных позиций — реципиента, донора, транзитёра населения или сочетаний этих статусов — предполагает многообразие центров силы на миграционном поле в зависимости от той роли, которую они играют (иммиграционная, эмиграционная или транзитная). Миграционный статус страны находит своё отражение в широком диапазоне и вариативности использования средств убеждения: от вепонизации людских потоков и санкционных антимиграционных заградительных до сотрудничества в сфере миграции и продвижения притягательного образа страны с помощью либеральных и инклюзивных мер миграционной политики. Помимо ведущих держав центрами миграционной силы могут становиться и государства, обретающие в соответствующем контексте и временном интервале лидерство в субрегиональном миграционном пространстве внешней политики, что обуславливает подвижность и переменчивость конфигурации центров миграционной силы. Нынешнее развитие миграции и усиление её связи с внешнеполитическими процессами указывают на расширение использования миграционной силы и повышение роли центров миграционной силы в международных отношениях.

Ключевые слова: международная миграция населения, международные отношения, ведущая держава, центр силы, миграционная сила, центр миграционной силы, инструментализация миграции, миграционные партнёрства, миграционная привлекательность страны.

DOI: 10.31857/S0869587325080069, EDN: DTHZDK



ЦАПЕНКО Ирина Павловна — доктор экономических наук, заведующая сектором социально-экономического развития и миграционных процессов ИМЭМО РАН. СУБХАНГУЛОВА Ксения Альмировна — кандидат экономических наук, научный сотрудник сектора социально-экономического развития и миграционных процессов ИМЭМО РАН.

В миграционных исследованиях, относящихся к социально-экономическим, демографическим, географическим и близким им дисциплинам, термин “миграционный центр” традиционно ассоциируется с пунктом/ареалом притяжения крупных потоков населения. Подобный статус может подразумевать, но не обязательно означает наличие у страны назначения рычагов воздействия на территории исхода. Обладание такими управленческими возможностями, причём не только крупных принимающих государств, но и других ведущих участников миграции, может быть отражено в понятии “центр миграционной силы”.

В условиях расширения масштабов миграции и нарастания её внешнеполитических вызовов (в контексте усиления невоенных угроз безопасности и распространения гибридных войн) представления о центрах силы как средоточиях потенциала и инструментария воздействия в военной, полити-

ческой, финансово-экономической, научно-технической, культурно-образовательной и информационно-коммуникационной сферах нуждаются в дополнении. Речь идёт о включении в этот перечень миграционного параметра.

Предпринимая исследование, мы ставили перед собой следующие задачи: отталкиваясь от классических дефиниций силы и центра силы в теории международных отношений, проанализировать трактовки миграционной силы и уточнить содержание этой категории; обосновать введение понятия центра миграционной силы и дать его определение; охарактеризовать современные центры миграционной силы и их разные типы; описать практику и выявить основные тенденции внешнеполитической инструментализации миграционной политики ведущих держав, а также стран-лидеров субрегионального уровня. Использованы работы известных российских и зарубежных учёных в области теории международных отношений, ведущих исследователей миграции, в частности её внешнеполитических аспектов, а также статистические данные Отдела народонаселения ООН, Управления верховного комиссара ООН по делам беженцев, ЮНЕСКО и ОЭСР.

ПОНЯТИЯ МИГРАЦИОННОЙ СИЛЫ И ЦЕНТРА МИГРАЦИОННОЙ СИЛЫ

В теории международных отношений предложены разные толкования категорий силы и центров силы, причём их многообразие усиливается в условиях трансформации миропорядка, выстраивания новых структур и систем меняющейся архитектуры центров силы и расширения инструментария невоенного воздействия. В обновляемой конфигурации международных отношений всё отчётливее вырисовываются *силовые проекции миграции*. Определение силы как “способности влиять на поведение других, чтобы получить желаемые результаты” американского политолога Дж. Ная-мл. [1, р. 2], а также выделение в теории международных отношений разных измерений и форм использования силы служат методологическим фундаментом для изучения и концептуализации соответствующей проблематики в сфере миграции.

Мексиканские политологи Н. Сальталамакья и М.-Х. Урсуа трактуют миграционную силу (*migration power*) как способность влиять на других участников путём воздействия на миграционные потоки [2]. На наш взгляд, данное определение могло бы стать более ёмким, если бы речь шла о более широком воздействии на миграционные процессы — не только о регулировании людских потоков, но также об условиях проживания разных категорий мигрантов на новом месте, их обеспечении материальными и социальными благами, наделении правами и возможностями политической деятельности и полно-

ценной инкорпорации в принимающее общество. Напротив, предлагаемое британскими политологами И. Фернандес-Молина и Г. Цурапасом определение миграционной силы как “создание... в процессе и/или через посредство социальных отношений эффектов, формирующих возможности, интересы и идентичности других государств и негосударственных акторов, включая мигрантов, которые участвуют в управлении международной миграцией” [3, р. 2466] представляется чрезмерно широким и в силу этого довольно туманным.

Сама постановка вопроса о *миграционной силе* отличается от традиционного представления о влиянии передвижений населения на включённые в этот процесс государства и в то же время фактически из такого понимания вытекает. Так, связанный с миграцией приток в принимающие страны рабочих рук, умов, талантов, капиталов, а в отдающие страны — денежных, технологических, социальных трансфертов и т.п., выступает фактором, способствующим экономическому росту и шире — общественному развитию, благоприятствуя тем самым укреплению внешнеполитических позиций государств, которые получают такие ресурсы. Вместе с тем вызываемые эмиграцией потери ценных человеческих, а порой и финансовых ресурсов или же сопряжённые с иммиграцией дополнительные бюджетные расходы, дисбалансы на рынке труда, напряжённость межкультурных отношений, нарушения общественного порядка и др. создают трудности в функционировании государств, вовлечённых в передвижения населения, и могут становиться источниками международных разногласий. В отличие от подобных опосредованных эффектов миграции на внешнеполитическую сферу, обладание и оперирование миграционной силой носит непосредственный характер.

Во-первых, исходя из трактовки силы как кумулятивной мощи и потенциала ресурс миграционной силы можно соотнести со значимостью позиций конкретных государств как участников миграционных процессов. (Изначально этот подход, связанный с воззрениями классических реалистов начиная с Г. Моргантау, традиционно сводился к материальным возможностям — военным, экономическим, демографическим, географическим и т.п.; позднее, в представлениях приверженцев либерализма и конструктивизма он вобрал в себя и нематериальные активы — технологические, информационно-культурные и т.п.) Параметр миграционной силы можно операционализировать с помощью показателей численности иммигрантов в принимающих государствах, численности эмигрантов, проживающих за пределами отдающих государств, а также оценок интенсивности транзитных потоков через территорию государств, занимающих промежуточное географическое положение между странами исхода и назначения мигрантов. При этом возможности использования и характер миграционной силы варьируются

в зависимости от выполняемых этими государствами миграционных ролей: донора, реципиента или транзитёра мигрантов (либо сочетания этих ролей).

Во-вторых, толкуя силу как влияние и воздействие, миграционную силу правомерно связывать с искусством управления миграцией (*migration statecraft*), в частности с использованием инструментария миграционной политики, который оказывает влияние на мирополитические процессы, поведение других международных акторов и достижение внешнеполитических целей. М. Тейтельбаум, подчёркивая стремление стран назначения противодействовать въезду недокументированных иностранцев, характеризует контроль стран происхождения мигрантов за исходящими потоками как “своего рода национальный ресурс”, с которым надо уметь обращаться [4, р. 447].

Отмечая многомерность и комплексность понятия миграционной силы, И. Фернандес-Молина и Г. Цурапас раскрывают его как комбинацию и взаимодействие четырёх типов миграционных сил: принуждающей, институциональной, структурной и продуктивной [3, р. 2462]. Предложенная типология воспроизводит применительно к миграции схему сил, разработанную в 2005 г. американскими политологами М. Барнетом и Р. Дювалем. Хотя классификации инструментов, используемых в миграционной сфере внешней политики, нельзя отказать в оригинальности, всё же выделенные приёмы в большой мере соотносятся с хорошо известными формами и методами использования силы¹.

Закономерно возникает вопрос: как обладание миграционной силой отражается на внешнеполитическом статусе конкретного государства и право-

мерно ли говорить о государстве, обладающем такой силой, как о центре миграционной силы? При анализе предложенных в российской литературе определений центров силы некоторые трактовки, с точки зрения целей данного исследования, представляются недостаточно полными. В частности, это касается толкования центров силы как “своего рода концентрации возможностей и потенциала, дающих... статус лидера” [5, с. 135] или их понимания как международных акторов, обладающих комплексной мощью (военной, экономической, финансовой, научно-технической), способностью регулировать мировые процессы и внешнеполитическое поведение других акторов [6, с. 45].

С одной стороны, в условиях гибридных войн, когда вепониизируются, то есть превращаются в оружие, все подходящие для достижения цели средства, силовой потенциал формируется за счёт гораздо более многообразных ресурсов, включая демографические (с учётом состава и *мобильности* населения, политико-географических, природных, интеллектуальных, информационных, культурных, политических возможностей). Потенциальная миграционная сила не просто включается в этот боевой арсенал, но и обретает всё большую значимость в условиях секьюритизации миграционной повестки (что требует повышения готовности государств к противодействию миграционным угрозам безопасности) и возведения миграционного регулирования в ранг “высокой политики” международного уровня.

С другой стороны, важна не только латентная способность влиять на мировую и региональную политику и политику отдельных стран — способность, которую рассматривают в качестве критерия ведущей мировой державы (К. Уолтц, Р. Гилпин, Б. Бузан, О. Уэвер и др.), но и непосредственное осуществление регулирующей деятельности в области международных отношений, оказание реального, причём существенного, воздействия на эту сферу. Подобного широкого геополитического подхода к определению веса стран на мировой арене придерживаются, в частности, Т.А. Шаклейна [7] и А.В. Кузнецов [8].

В условиях геополитических трансформаций происходит *умножение очагов силы*, атрибуты которых, помимо традиционных великих (ведущих мировых) держав, обретает растущее число региональных (концептуализированных Д. Нолте), средних (Р. Кеохейн), малых, типичных и нетипичных (Г. Абонданца) и т.п. государств. В результате в формирующейся полицентричной конфигурации международных отношений усложняется иерархия власти. Более того, согласно концепции Дж. Ная-мл., возникающая система является многоуровневой, включающей разнотипные и неравнозначные факторы силы и интересы, к числу которых относится и миграция [9, р. 88]. Это предполагает существование центров разных сил, в том числе и миграционной, архитектура которых может при-

¹ Так, принуждающая сила (под которой понимают применение средств сдерживания и устрашения, политическую обусловленность тех или иных мер, провоцирование миграционных потоков) предполагает оказание жёсткого (*hard*) давления (К. Уолтц) и наложение отрицательных санкций. Структурная сила (финансирование и наращивание потенциала, перераспределение функций и полномочий государств по регулированию миграции) подразумевает подкуп и побуждение к сотрудничеству с применением позитивных санкций, которые могут быть отнесены как к жёсткой, так и липкой (*sticky*) силе (Д. Хаберли, Д. Войчик). Продуктивная сила (тракуемая указанными исследователями как дискурс секьюритизации/десекуритизации миграции, категоризация, распространение и оспаривание норм) может быть как мягким (*soft*) влиянием (Дж. Най) посредством кооптации, внушения, демонстрации положительного примера и т.п., так и хитрым или острым (*sharp*) манипулятивным воздействием (К. Волкер, Дж. Людвиг). Институциональная сила (реализуемая через посредство международных режимов регулирования, региональных организаций, институтов двустороннего сотрудничества и диаспор), скорее, представляет собой арсенал институциональных инструментов, которые могут быть задействованы как для оказания давления, так и для формирования привлекательного имиджа международного актора.

нимать разные формы в зависимости от тех или иных силовых проекций и измерений.

Исходя из вышеизложенного *центры миграционной силы* — это международные акторы, преимущественно крупные участники миграционных процессов, которые не только способны с помощью миграционного инструментария воздействовать на поведение других акторов и добиваться внешнеполитических целей, но и реализуют в практике международных отношений силовой миграционный потенциал, что требует определённых условий, включая наличие воли, финансово-экономических и политических возможностей. В первую очередь это относится к государственным акторам и их интеграционным объединениям, таким, например, как ЕС. Однако существуют и сетевые структуры типа международных преступных картелей, которые занимаются контрабандой и торговлей мигрантами.

На свойства государства как регулятора миграционных процессов на рубеже веков обращал внимание американский политолог Д. Холлифилд, который ещё в прошлом столетии предложил концепт так называемого *миграционного государства*, одна из важнейших функций которого — управление миграцией и взаимодействие с другими участниками миграционных процессов. В современных исследованиях деятельность миграционного государства в регионах глобального Юга характеризуется с утилитаристских позиций и в инструменталистском ключе, как “стремление извлечь выгоду из трансграничной мобильности, как добровольной, так и вынужденной, основанное на отношении к последней как к товару, который надо использовать для увеличения доходов и власти государства” [3, р. 2476].

Внешнеполитическая инструментализация, или использование миграционной политики в качестве инструмента в международных отношениях, о которой писали американские учёные М. Тейтельбаум, К. Митчел, М. Вайнер и др., ныне стала предметом быстрорастущего числа исследований [10–12 и др.]. Более того, этот феномен нашёл теоретическое обоснование в трёх новых конструктах: вепонизации² миграции [13], миграционной дипломатии [14³, 15⁴] и экстернализации миграционной политики [16, 17].

² Вепонизация — использование в качестве оружия мирных объектов, не предназначенных для боевых действий.

³ Немецкий исследователь Э. Тиолле, которая ввела в научный оборот этот термин, характеризовала миграционную политику “как косвенную форму внешней политики” [14, р. 110].

⁴ Г. Цурапас определяет миграционную дипломатию как “использование дипломатических инструментов, процедур для управления трансграничной мобильностью населения... равно как и стратегическое использование миграционных потоков в качестве средства достижения прочих целей” [15, pp. 2367–2368], то есть целей, непосредственно не связанных с миграцией; в их числе выполнение тех или иных политических требований, улучшение условий торговли и инвестирования и т.п.

Несмотря на недавнее появление в научной литературе ряда понятий, которые улавливают и обозначают новые силовые реалии в сфере международных отношений, в имеющемся категориальном аппарате сохраняются некоторые лакуны. Очевидна потребность в обновлении аналитического инструментария, используемого для изучения формирующейся архитектуры миропорядка, а именно для характеристики выстраиваемых подсистем центров разных, в том числе отраслевых, сил, аккумулируемых и применяемых в конкретных областях общественной жизнедеятельности, в частности в сфере миграции. В связи с этим возникло новое понятие “центр миграционной силы”, уточнена категория “миграционная сила”.

СОВРЕМЕННЫЕ ЦЕНТРЫ МИГРАЦИОННОЙ СИЛЫ

Статистика ООН, равно как и других международных организаций, свидетельствует о массовости людских трансграничных потоков, об устойчивом росте численности международных мигрантов — с 174.6 млн человек в 2000 г. до 304 млн в 2024 г., опережающем демографическую динамику, о повышении доли уроженцев других стран в мировом населении — с 2.83 до 3.72% за тот же период [18]. Умножение потомков переселенцев придаёт ещё большую масштабность этому глобальному процессу, всё теснее вплетая его в общественные отношения. Интенсификация потоков вынужденных, гонимых социальными и природными катаклизмами, и недокументированных мигрантов порождает многообразные вызовы безопасности людей, обществ и государств.

В силу указанных обстоятельств, усугубляемых множественной миграционной взаимозависимостью государств, инерционной устойчивостью сложившихся маршрутов движения населения в сочетании с реакцией на резко меняющиеся обстоятельства, расширяются возможности использования миграции для внешнеполитического давления одних государств на другие [12]. Концентрация потоков между ограниченным числом государств способствует сосредоточению миграционной силы. Статус главных участников миграционных процессов (крупных доноров, реципиентов и транзитёров мигрантов) конвертируется в роль ведущих игроков на миграционной площадке внешней политики и, соответственно, значимых субъектов международных отношений, формирующих вокруг себя силовые пространства и фактически обретающих значение центров миграционной силы. По аналогии с известными видами миграционной дипломатии — иммиграционной, эмиграционной и транзитной [19] — можно условно выделить три типа центров миграционной силы. Более того, учитывая нередкую включённость государств в миграцион-

ные процессы в разных качествах (одновременно в роли реципиента и/или донора и/или транзитёра) одна и та же страна может выступать в качестве как центра иммиграционной силы, так и эмиграционной или транзитной.

Приём больших контингентов мигрантов надеется государства-хабы рычагами внешнеполитического влияния на страны исхода путём расширения или ограничения каналов легального въезда и права проживания иностранных граждан. Такие государства могут выступать в качестве *центров иммиграционной силы*. В то же время отдающие страны располагают механизмами зарубежного лоббирования своих интересов благодаря наличию крупных диаспор соотечественников. Кроме того, они могут воздействовать на государства назначения путём стимулирования или сдерживания исходящих потоков (при условии управляемости последних). Подобные страны можно рассматривать как *центры эмиграционной силы*. Транзитные государства, оказывающиеся на пути основных миграционных маршрутов, в первую очередь с глобального Юга на Север, с одной стороны, обременены издержками, связанными с ролью “проходного двора”, и подвержены рискам миграционных кризисов; с другой стороны, они могут инструментализировать миграцию и извлекать политические и экономические выгоды из своего географического положения, становясь *центрами транзитно-миграционной силы*.

Если сопоставить список ведущих держав, сформированный А.В. Кузнецовым [8], с перечнем главных реципиентов и доноров населения, можно заметить, что практически все ведущие державы относятся к числу если не ключевых, то важных участников миграционных процессов, выполняющих при этом разные миграционные роли или их сочетания.

Как правило, традиционные центры силы, представленные высокоразвитыми странами, являются давними (или относительно давними) и главными мировыми реципиентами населения. Так, Великобритания, Германия, Испания, Италия, Россия, США, Франция и Япония, сталкивающиеся с острой структурной нехваткой местных работников и привлекающие иностранцев более высоким уровнем благосостояния и качества жизни, лучшими перспективами карьеры и профессиональной самореализации, относятся к числу крупнейших принимающих стран, которые (например, Великобритания, Германия, Россия и США) при этом отдают часть своего населения другим территориям, в первую очередь на Севере (рис. 1, 2). В качестве средоточия глобальных миграционных систем или их региональных подсистем такие государства выступают в роли *глобальных и /или региональных центров иммиграционной силы*. В их числе и ЕС как коллективный центр в едином лице, участники которого гармонизировали многие аспекты национального законодательства и проводят общую миграционную политику в отношении третьих стран.

Миграционный профиль новых центров силы гораздо разнообразнее. С одной стороны, в их составе гиганты Востока — Китай и Индия, главные глобальные доноры населения, обладающие признаками глобальных центров эмиграционной силы. С другой стороны, в указанную группу входят и восходящие региональные державы Мексика, Пакистан, Египет, Индонезия и др., быстрое развитие которых формирует большие контингенты мобильной, но нередко невостребованной на родине рабочей силы, устремляющейся главным образом в другие страны региона. Одновременно усиливаются позиции региональных держав как региональных центров притяжения населения. В первую очередь это Саудовская Аравия, Турция, Иран, а также ЮАР, Нигерия, Арген-

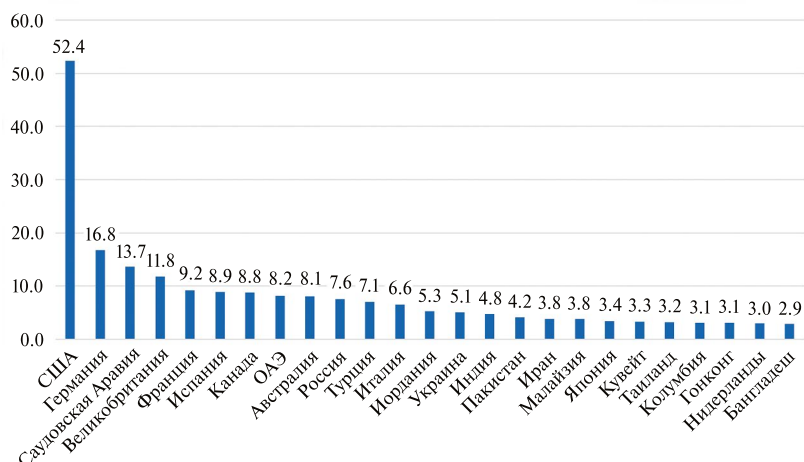


Рис. 1. Главные страны — реципиенты международных мигрантов, 2024 г., млн человек
Составлено по: [18].

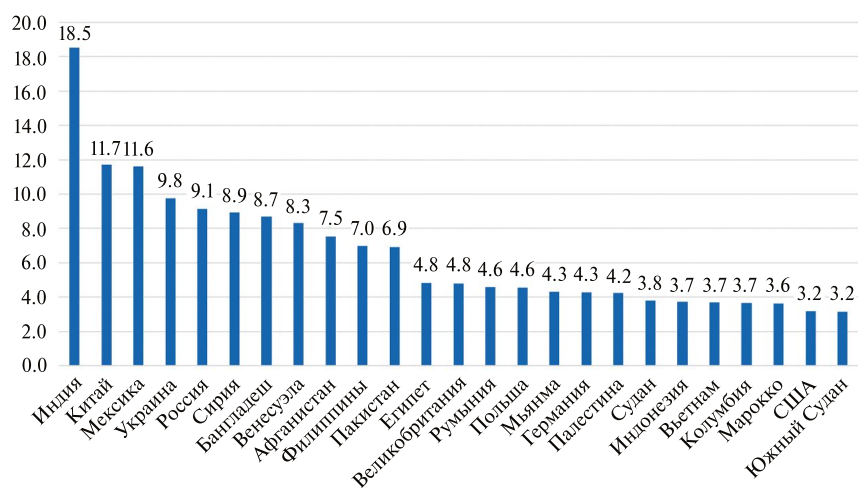


Рис. 2. Главные страны — доноры международных мигрантов, 2024 г., млн человек
Составлено по: [18].

тина и Индонезия (см. рис. 1, 2). Согласно данным УВКБ ООН, в 2024 г. Иран и Турция стали лидерами по числу принятых беженцев, главным образом из соседних и близлежащих стран (3.8 млн и 3.1 млн соответственно) [20, р. 13], что в силу поведенческих особенностей перемещённых лиц и драматизма событий придаёт указанным странам гораздо большую миграционную силу по сравнению с реципиентами аналогичных по численности когорт добровольных мигрантов. Принадлежность региональных держав к числу значимых региональных доноров и реципиентов населения наделяет их новыми признаками державности и позволяет квалифицировать эти государства как региональные центры эмиграционной и иммиграционной силы.

По странам транзита пока нет систематизированной сопоставимой статистики, однако резонансные миграционные кризисы высвечивают главные маршруты транзитной миграции: из тропической Африки через страны Магриба в ЕС; из Южной

Азии и с Ближнего Востока через Турцию в ЕС; из Латинской Америки через Мексику в США (рис. 3). Помимо региональных держав (Турция и Мексика), ведущими транзитёрами мигрантов выступают Марокко, Ливия, Алжир и Тунис, соседство которых с ведущими странами назначения умножает их миграционную силу, придавая им свойства региональных центров миграционной силы.

Сочетание позиций государств как ведущих держав и как центров миграционной силы в определённой мере способствует упрочению обоих статусов, подкрепляемому получением доступа к дополнительным силовым ресурсам: ведущие державы наращивают арсенал и диверсифицируют средства внешнеполитического воздействия за счёт миграционных инструментов, а центры миграционной силы наделяются более широкими финансово-экономическими, политическими и т.п. возможностями. (В то же время, в отличие от классического представления о наращивании мощи страны с умножением её насе-

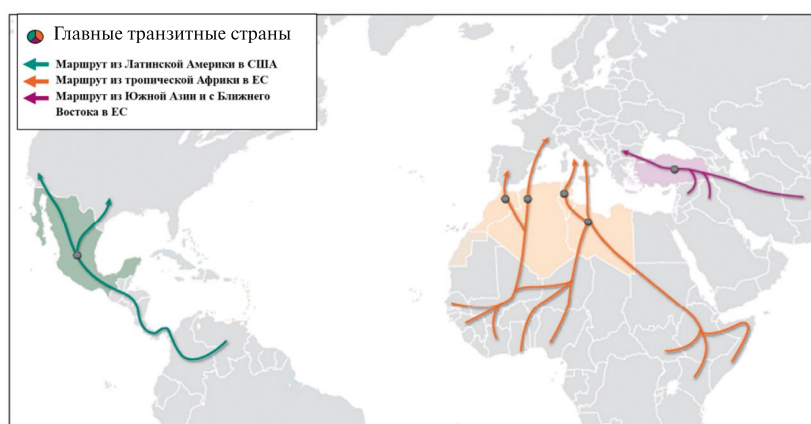


Рис. 3. Основные маршруты транзита мигрантов
Составлено по: [21, р. 250].

ления, миграционная сила может увеличиваться не только за счёт иммиграции, но и в условиях транзита людских потоков по территории государства или даже когда оно отдаёт своё население другим странам.) Вместе с тем рейтинги крупнейших мировых реципиентов и доноров населения всё же имеют некоторые отличия от ранжирования ведущих держав по показателям численности иммигрантов на их территории и их эмигрировавших уроженцев соответственно⁵. Это наблюдение согласуется с положением теории международных отношений о том, что в многоуровневой системе миропорядка центры разных сил могут не совпадать друг с другом [5, с. 139], особенно с учётом неравномерности, асинхронности развития разных элементов системы миропорядка, включая его миграционную подсистему.

Как показывает практика международных отношений, в частности конкретные случаи вепонизации миграции, большими силовыми ресурсами могут обладать и оперировать не только и не обязательно ведущие державы и главные принимающие, отдающие либо транзитные государства. При определённых условиях, а именно если есть возможность нанести противостоящему государству большой ущерб, породить серьёзные угрозы безопасности или, напротив, принести немалые выгоды, черты очагов силы могут на время, спорадически приобретать и страны, не относящиеся к числу крупных участников миграционных процессов, такие, например, как Албания, Вьетнам, Гаити, Гондурас, Кения, Куба, Македония, Таиланд, Уганда, Чад, Эфиопия.

⁵ В первую мировую двадцатку принимающих стран не входят такие региональные державы, как ЮАР (29-я позиция по численности иммигрантов), Аргентина (39), Мексика (43), Китай (44), Бразилия (49), Нигерия (50), Египет (56) и Индонезия (88), которые тем не менее являются важными политическими фигурами в региональном миграционном пространстве. И напротив, обычно не считающиеся ведущими державами Канада и Австралия выступают в качестве основных принимающих стран (7-я и 9-я позиции соответственно) в силу сочетания крупномасштабной иммиграции с экономическим, демографическим, культурно-языковым потенциалом, географическими характеристиками и способны действовать в качестве центров миграционной силы. К последним можно отнести и Малайзию (18), входящую в группу так называемых азиатских тигров второй волны.

Ещё заметнее расхождение по показателям эмиграции. В числе основных доноров населения — переживающие затяжные кризисы и конфликты и являющиеся крупными очагами беженства Украина, Сирия, Афганистан, Венесуэла, Палестина, Мьянма и Судан, которые лишены атрибутов державности и миграционной силы. Вместе с тем обращает на себя внимание опыт Филиппин — не просто одной из главных отдающих стран мира (10-я позиция по численности эмигрантов), но государства, политика которого ориентирована на подготовку своих граждан к выезду на работу за границу, организацию их трудоустройства и защиту их прав за рубежом — одна из лучших мировых практик, что также даёт основания рассматривать эту страну как центр миграционной силы.

В результате совокупный дисбаланс сил в противостоянии более развитых и могущественных государств и стран, которые не располагают экономическими, политическими или военными рычагами давления, можно корректировать с помощью *миграционных силовых инструментов*, вплоть до изменения асимметрии отношений на прямо противоположную. В результате миграция становится серьёзным “оружием слабых” [13, р. 37] в торге с сильными. Это, в свою очередь, придаёт специфику конфигурации и функционированию центров миграционной силы, дополняя когорту их ключевых глобальных и региональных фигур эпизодически возникающими локальными очагами миграционной силы. По сравнению с относительно стабильным перечнем мировых и региональных держав, состав центров миграционной силы более подвижен, поскольку отражает переменчивость миграционных потоков и, соответственно, рейтингов крупных доноров и реципиентов населения, а также учащение случаев инструментализации миграции и ограниченную продолжительность значительной части подобных инцидентов.

МИГРАЦИОННАЯ СИЛА ВО ВНЕШНЕЙ ПОЛИТИКЕ

Индикатором активности и влиятельности центров миграционной силы могут служить масштабы и эффективность применения миграционных мер, направленных на продвижение национальных (или макрорегиональных) интересов в территориальных пространствах других государств. Можно условно выделить три направления политики центров миграционной силы: принуждение миграцией, побуждение к миграционному сотрудничеству и продвижение позитивного национального образа средствами миграционной политики.

Принуждение миграцией. Механизмы жёсткого давления на оппонентов, запускаемые миграционной дипломатией принуждения [15], варьируются в зависимости от миграционных ролей международных акторов. Центры эмиграционной и транзитной силы искусственно провоцируют и пропускают по своей территории людские потоки, открывая им свои границы, привлекают диаспоры соотечественников для лоббирования своих интересов в странах их проживания, в том числе с использованием неконвенциональных средств, включая теракты, в целях дестабилизации, дискредитации оппонентов и др. В свою очередь центры иммиграционной силы ужесточают правила въезда, пребывания, проживания, занятости, коммерческой деятельности и т.п. определённых категорий мигрантов, вплоть до закрытия границ для выходцев из конкретных государств и депортации нежелательных иностранцев, или же манипулируют угрозами таких действий.

До недавнего времени использование миграционного прессинга имело ограниченные масштабы, носило скорее эпизодический характер. Однако в XXI в. оно распространяется всё шире в рамках общей тенденции к наращиванию применения жёсткой, а также острой силы⁶. Согласно исследованию американского политолога К. Гринхил, за период с 1951 по 2021 г. имел место 81 случай вепонизации миграции [22, pp. 156–157]. Если за полувековой период 1951–2000 гг. было зафиксировано 46 явных подобных ситуаций, то есть менее одного случая в год, то за двадцатилетие с 2001 г. произошло 35 таких инцидентов – в среднем 1.5 инцидента в год⁷. Помимо нерегулярного и преходящего характера подобных ситуаций, очевидно, что (с учётом соотношения возможных приобретений и цены их достижения) лишь небольшая часть стран, обладавших миграционной силой, использовала её для жёсткого прессинга.

Оппортунистическое миграционное поведение чаще демонстрируют менее демократичные страны Юга. Ради получения политических и финансовых выгод они угрожают направлением в государства Севера массовых людских потоков, способных нанести серьёзный урон политической стабильности и национальной безопасности государств назначения. Страны, находящиеся на пути стихийных людских потоков и становящиеся “накопителями беженцев” (refugee warehouses) [23, p. 724], эксплуатируют свое положение в системе региональной безопасности, превращаясь в “рантье, наживающихся на беженцах” [24, p. 34]. Так, Турция и Иордания, шантажируя ЕС новой волной миграционного кризиса, смогли добиться от Союза в 2016 г. крупных пакетов помощи (6 млрд и 1.4 млрд евро соответственно) в обмен на обратный приём проникших через их территорию в Европу недокументированных иностранцев. При этом Турция использовала так называемую миграционную сделку с ЕС для усиления своего влияния в регионе и укрепления своей внешнеполитической идентичности [25, p. 187].

Манипулируя взятыми на себя более демократичными и богатыми государствами обязательствами по приёму лиц, нуждающихся в международной защите и помощи, и загоняя эти государства в “ловушку лицемерия” (двойные стандарты прав человека), миграционные рантье паразитируют на подобной уязвимости. Так, в 2010-е годы Пакистан и Кения,

неоднократно угрожая выслать находившихся там многочисленных беженцев и каждый раз повышая планку финансовых требований, смогли получить от США, Великобритании, Японии и ЕС дополнительную внешнюю помощь в 300 млн долл. [26, pp. 540–541].

Государства Севера также всё активнее оперируют инструментами миграционной политики в виде санкций либо в качестве ответных шагов на попытки их миграционного устрашения [11]. Установлены серьёзные миграционные кордоны против граждан России, Беларуси, КНДР, Ирана, Китая и целого ряда других государств, выдвигаются угрозы визовых рестрикций в отношении широкого круга стран. Многие из таких ограничений носят неизбирательный характер, противоречат принципам, закреплённым в документах ООН.

В предыдущие десятилетия инициаторам тогда ещё редких случаев *вепонизации миграции* зачастую удавалось добиваться своих требований. Однако наращиваемые ныне государствами Севера миграционные заграждения несопоставимы по силе воздействия с массовыми стихийными потоками, порождаемыми на Юге. Подобная практика, имея в виду усиление сопротивления рестрикциям, вводимым принимающими странами, и адаптацию к ним, вряд ли могут возыметь большой эффект и несут скорее демонстративный характер [12].

Побуждение к сотрудничеству в сфере миграции. Использование миграции как инструмента сотрудничества и достижения взаимовыгодных соглашений (так называемая кооперативная миграционная дипломатия [15]) можно отнести к действию “липкой силы”, которая нередко предполагает скрытый подкуп контрагентов. В то же время разыгрывание миграции в качестве “транзакционной козырной карты” на переговорах порой рассматривается как вепонизация [23, p. 709], представляющая жёсткую силу.

В целях противодействия стихийному притоку нежелательных, недокументированных мигрантов, включая контрабанду последних, более богатые принимающие государства привлекают к сотрудничеству отдающие и транзитные страны, предоставляя им разного рода содействие и уступки. Использование кооперационных инструментов организационно сопряжено с так называемой *экстернализацией миграционной политики*. Под этим термином понимается осуществление мер по регулированию миграции за пределами территории регулирующего государства. Происходит делегирование, фактически передача на аутсорсинг считающимся безопасными странам полномочий по пограничному контролю и фильтрации мигрантов, включая рассмотрение прошений о предоставлении убежища. На эти страны также перекладывается бремя ответственности за незаконный въезд с их территории в данное государство (союз государств),

⁶ Жёсткая сила – это политика принуждения, которую проводит одна страна, чтобы заставить другую страну предпринять определённые действия или изменить свои решения. К методам жёсткой силы относят демонстрацию военной силы, экономические санкции, дипломатические угрозы и т.п. Острая сила – форма внешнеполитической деятельности, которая предполагает использование средств манипулирования общественным мнением в других странах и направлена на подрыв их политических систем.

⁷ Рассчитано по: [13, pp. 16–17; 22, pp. 156–157].

что предполагает их обязанность принимать обратно возвращаемых мигрантов [17]⁸.

Экстерриториальное регулирование миграции стало неотъемлемым элементом стратегии внешней политики ЕС. Этот курс получил воплощение в Европейской политике соседства, пактах, партнёрствах и иных совместных, в том числе неофициальных, построенных на принципах обусловленности проектах по миграции и беженству с третьими странами: Индией, Марокко, Тунисом, Египтом, Турцией и др. ЕС выделяет сотрудничающим государствам дополнительные визы для въезда в него их граждан, предоставляет финансовые средства на нужды развития и гуманитарную помощь, в частности беженцам, оказывает содействие в улучшении системы пограничного контроля, реализации программ профессиональной подготовки населения, реинтеграции возвращаемых мигрантов и др. [28], рассматривая эти меры как политические инвестиции.

Подобная политика проводится и на Североамериканском континенте. В целях создания эшелонированной системы кордонов против недокументированных мигрантов власти США выделили в нулевые годы Мексике 2.8 млрд долл. Кооперация Мексики с центральноамериканскими странами и разделение ими ответственности за нелегальные перемещения населения способствовали резкому росту числа задержаний незаконно находившихся в Мексике иностранцев, их депортаций оттуда в страны-доноры и как следствие уменьшению нарушений южной границы США [23, р. 712], что говорит о высоком потенциале согласованных конструктивных инициатив [29].

Однако нарушение одной из сторон принятых обязательств и уменьшение или утрата выгоды другой ставят под вопрос реализацию такого курса. Фактически страны, вовлечённые в миграционную кооперацию, становятся её заложниками. Например, в случае повышения США тарифов на импорт мексиканских товаров вопреки НАФТА–ЮСМКА⁹ Мексика, в свою очередь, может пересмотреть ми-

грационные договорённости. В то же время, когда страны исхода и транзита незаконных мигрантов пытаются отказаться от обратного приёма депортируемых на их территорию мигрантов, страны назначения начинают играть “геополитическими мускулами”, пуская в ход пропаганду, навешивание ярлыков и угрозу визовых санкций [30].

Увеличивающееся число соглашений о сотрудничестве по вопросам миграции, как и случаев её вепонизации, свидетельствует о растущей активности центров миграционной силы. Сочетание и чередование ими политики кнута и пряника, шантажа и уступок говорит о множественности реализуемых государствами стратегий управления миграцией, широте диапазона применяемых инструментов, подвижности и размытости границ между кооперационными и принуждающими мерами.

Продвижение позитивного национального образа средствами миграционной политики. Помимо прочего, центры миграционной силы транслируют мягкое, косвенное, проактивное и нередко проявляющееся с временным лагом влияние, связанное с притягательностью либеральных и инклюзивных мер миграционной политики и шире геополитической привлекательности социальной модели конкретного государства или союза государств. В первую очередь это относится к сферам образования, культуры и гуманитарной помощи, хотя и не ограничивается ими. При этом территориальная мобильность, будучи важным каналом коммуникации людей, способствует распространению в мире информации о странах проживания или пребывания, ценностей, стилей поведения и формированию их узнаваемого образа. Интенсивность движения населения в конкретные государства может указывать на привлекательность их имиджа¹⁰.

Магнетизм принимающего государства зиждется на благоприятных условиях въезда, проживания, учёбы и трудовой деятельности определённых категорий мигрантов¹¹. Особый акцент делается на привлечение иностранных студентов путём предо-

⁸ Подобная политика соответствует концепту общества экстернализации (externalization society), предложенному немецким социологом Ш. Лессенихом. Этот теоретический конструкт предполагает, что в условиях глобального неравенства и асимметрии в международных отношениях богатые государства Севера живут за счёт ресурсов и благосостояния Юга и осуществляют экстернализацию издержек своих экономик — их перекладывание на периферийные регионы и более бедные страны мира [27, с. 77].

⁹ Североамериканское соглашение о свободной торговле (НАФТА) было подписано правительствами Соединённых Штатов Америки, Мексики и Канады в декабре 1992 г. В январе 1994 г. соглашение вступило в силу. На смену НАФТА пришло Соглашение Соединённые Штаты — Мексика — Канада (ЮСМКА), подписанное в 2018 г. Инициатором переговоров выступил президент Д. Трамп, поставивший целью добиться максимально выгодных для США условий сотрудничества с соседними странами.

¹⁰ Одним из ключевых параметров глобального индекса мягкой силы, построенного МВФ в 2024 г. по 66 странам, включая Россию (15-я позиция), является численность мигрантов. В первую десятку, возглавляемую Республикой Корея, входят известные центры миграционной силы: Япония, Германия, Китай, Италия, Франция, США, Великобритания и Испания [31, р. 9].

¹¹ Однако переманивание зарубежных высококвалифицированных специалистов, предпринимателей и инвесторов благодаря предоставляемым им и членам их семей преференциям в получении пмж и гражданства, трудовой деятельности и т.п. имеет неоднозначный эффект. Принимающие государства, которые ассоциируются с лучшими возможностями профессиональной карьеры и самореализации, бизнес-деятельности и др., в то же время нередко считаются виновными в ослаблении геополитических позиций отдающих государств из-за утечки умов, талантов и состояний.

ставления стипендий и возможностей получения образования на льготной основе, работы в стране обучения и др. Всё это в сочетании со знакомством приезжих студентов с местным укладом жизни должно способствовать формированию у них лояльного отношения к стране и его распространению за границей. Подобные установки, помимо чисто коммерческого интереса, являются неотъемлемым элементом внешней политики экспортёров образовательных услуг. Так, стремясь завести высокообразованных “друзей Марокко” среди африканской молодёжи, власти королевства выделяют стипендии студентам из стран континента [25]. Ещё заметнее подобный подход демонстрируют крупнейшие англоязычные центры обучения иностранных студентов — глобальные центры силы в сфере образования США, Великобритании и некоторых других стран. Весьма показательно, что подавляющая часть представителей международных организаций, большинство которых — уроженцы глобального Юга, получили образование в США и странах Западной Европы (рис. 4), чем, по-видимому, и объясняются политические симпатии таких чиновников.

На *имидж принимающих стран* влияют радушие приёма вынужденных мигрантов, доступность получения ими статуса беженца или временной защиты и щедрость социальной поддержки, особенно при высоком качестве жизни, как у Германии и Франции, не говоря уже о странах Северной Европы. Однако в форсмажорных условиях для лиц, ищущих убежища, предпочтительнее близлежащие безопасные территории, в основном на глобальном Юге. Данное обстоятельство учитывали власти Турции при продвижении за границей её образа как смелой, гостеприимной и щедрой страны, содействующей решению гуманитарных проблем в регионе [33].

Накоплению репутационного капитала способствует содействие полноценной, всесторонней

интеграции поселенцев и поддержание толерантных межэтнических и межкультурных отношений в принимающем обществе. Согласно Индексу политики интеграции мигрантов 2020 г. (MIPEX 2020), в список стран-лидеров в данной области, возглавляемый Швецией, вошли такие крупные реципиенты мигрантов, как Канада, США, Австралия, Бразилия и Испания [34]. Однако и страны, не имеющие развитой интеграционной политики, стремятся улучшить обращение с мигрантами, как, например, это делает Марокко, представляя себя светочем просвещённого авторитаризма и претендуя на усиление своего влияния на Чёрном континенте [25].

Диаспоры соотечественников традиционно рассматриваются странами исхода “как ресурс, который может быть мобилизован в поддержку их экономических и политических интересов” [24, р. 17]. В целях сохранения каналов влияния на соотечественников, проживающих за рубежом, власти отдающих государств поддерживают с ними отношения, осуществляют их правовую, культурно-языковую и иную поддержку, либерализуют правила выезда за границу. Вот некоторые примеры: Мексика оказывает содействие жителям США с мексиканскими корнями в получении водительских удостоверений; Марокко предоставляет своим эмигрантам двойное подданство в целях сохранения лояльности [25, р. 228]; Турция открывает за рубежом школы с обучением на турецком языке; Филиппины осуществляют программу организованной трудовой миграции.

Использование центрами миграционной силы разнообразных инструментов жёсткого давления и мягкого влияния, принуждения и сотрудничества, из комбинаций которых конструируются механизмы умной силы, нередко позволяет достигать искомым результатов, особенно в случае миграционных партнёрств. В то же время миграционные санкции,

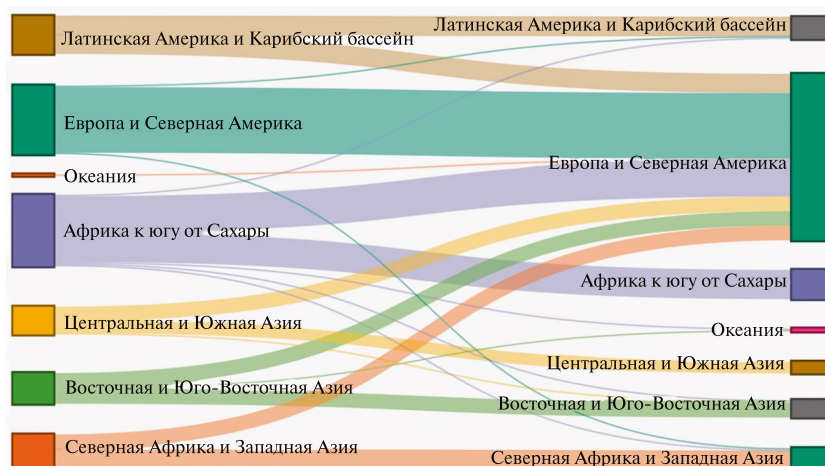


Рис. 4. Руководители страновых представительств агентств ООН по региону происхождения (слева) и регионам образования (справа)
Источник: [32].

массово и неизбирательно накладываемые большой группой стран глобального Севера, носят скорее показательный характер.

* * *

Одно из ярких проявлений современных геополитических трансформаций — выстраивание подсистемы центров миграционной силы. С учётом масштабов влияния эти центры могут позиционироваться как глобальные, региональные или субрегиональные. В зависимости от занимаемых миграционных ниш (реципиент, донор и/или транзитёр населения) такие субъекты международных отношений различаются по типу силы, которой они располагают — иммиграционная, эмиграционная и транзитная. Разнообразия здесь добавляют большой диапазон и множественность комбинаций применяемых инструментов миграционной дипломатии (принуждающих и кооперационных), а также средств мягкого косвенного влияния. Всё более широкое использование подобных приёмов крупными и относительно крупными игроками на миграционном поле внешней политики и нередкое достижение позитивных результатов позволяют говорить о повышении значения центров миграционной силы в международных отношениях.

Следует иметь в виду, что, по сравнению с перечнем мировых и региональных держав, круг центров миграционной силы более подвижен в силу изменчивости миграционных потоков, внезапности, спорадичности возникновения и ограниченной продолжительности случаев вепонизации миграции, неустойчивости миграционных партнёрств. Учёт современной специфики и сложной, многомерной динамики расстановки сил в этой сфере при выстраивании внешнеполитической стратегии России позволит укрепить её позиции как одного из ключевых мировых центров миграционной силы, что будет способствовать эффективной реализации ресурса миграционной политики и противодействию миграционным угрозам.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-551 “Глобальные и региональные центры силы в формирующемся мироустройстве”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nye J.S. Soft power: the means to success in world politics. New York: Public Affairs, 2004.
2. Saltalamacchia N., Urzúa M.-J. Migration power in interstate relations: A conceptual approach // Working paper. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4863344

3. Fernández-Molina I., Tsourapas G. Understanding migration power in international studies // International Affairs. 2024, vol. 100, no. 6, pp. 2461–2479. DOI: 10.1093/ia/iiae230
4. Teitelbaum M. Immigration, refugees and foreign policy // International Organization. 1984, vol. 38, no. 3, pp. 429–450. DOI: 10.1017/S0020818300026801
5. Акопов А.К. Политико-исторические концепции мирового порядка в теории международных отношений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Гуманитарные и общественные науки. 2013. № 4 (184). С. 134–141.
Akopov A.K. Political and historical concepts of world order in the international relations theory // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Humanities and Social Sciences. 2013, no. 4(184), pp. 134–141. (In Russ.)
6. Супота Н.М. Новый мировой порядок: тенденции и перспективы становления // Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016.
Sirota N.M. New world order: trends and prospects of formation // Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016. (In Russ.)
7. Шаклеина Т.А. Великие державы и региональные подсистемы // Международные процессы. 2011. Т. 9. № 2. С. 29–39.
Shakleina T.A. Great powers and regional subsystems // International Trends. 2011, vol. 9, no. 2, pp. 29–39. (In Russ.)
8. Кузнецов А.В. Разнообразие возможных центров силы нового мироустройства // Политическая наука. 2022. № 4. С. 107–120. DOI: 10.31249/poln/2022.04.05
Kuznetsov A.V. Variety of possible centers of force in the new world order // Political science (RU). 2022, no. 4, pp. 107–120. DOI: 10.31249/poln/2022.04.05 (In Russ.)
9. Nye Jr. J.S. What new world order? // Foreign Affairs. 1992, vol. 71, no. 2, pp. 83–96. DOI: 10.2307/20045126
10. Пагани К. Инструментализация миграции: управление миграционными потоками в двустороннем формате // Международные процессы. 2021. Т. 19. № 1(64). С. 103–119. DOI: 10.17994/IT.2021.19.1.64.8
Pagani C. Migration statecraft managing migration flows at a bilateral level // International Trends. 2021, vol. 19, no. 1(64), pp. 79–91. DOI: 10.17994/IT.2021.19.1.64.14
11. Войников В.В. Противодействие инструментализации мигрантов как элемент внешнего измерения иммиграционной политики ЕС // Современная Европа. 2024. № 3. С. 5–16. DOI: 10.31857/S020170832403001X
Voynikov V.V. Countering the instrumentalization of migrants as an element of the external

- dimension of EU immigration policy // *Contemporary Europe*. 2024, no. 3, pp. 5–16. DOI: 10.31857/S020170832403001X (In Russ.)
12. Цаненко И.П. Внешнеполитические вызовы и инструментализация миграции // *Полис. Политические исследования*. 2025. № 1. С. 134–148. DOI: 10.17976/jpps/2025.01.10
Tsapenko I.P. Challenges of migration for foreign policy and its instrumentalization // *Polis. Political Studies*. 2025, no. 1, pp. 134–148. DOI: 10.17976/jpps/2025.01.10 (In Russ.)
 13. Greenhill K. *Weapons of Mass Migration: Forced Displacement, Coercion and Foreign Policy*. Ithaca: Cornell University Press, 2010.
 14. Thiollet H. Migration as diplomacy: labor migrants, refugees, and arab regional politics in the oil-rich countries // *International Labor and Working-Class History*. 2011, vol. 79, pp. 103–121. DOI: 10.1017/S0147547910000293
 15. Tsourapas G. Migration diplomacy in the Global South: cooperation, coercion and issue linkage in Gaddafi's Libya // *Third World Quarterly*. 2017, vol. 38, no. 10, pp. 2367–2385. DOI: 10.1080/01436597.2017.1350102
 16. Lavenex S., Uçarer E. The external dimension of europeanization: the case of immigration policies // *Cooperation and Conflict*. 2004, vol. 39, no. 4, pp. 417–443. DOI: 10.1177/0010836704047582
 17. Laube L. Diplomatic side-effects of the EU's externalization of border control and the emerging role of “transit states” in migration diplomacy // *Historical Social Research*. 2021, vol. 46, no. 3, pp. 78–105. DOI: 10.12759/hsr.46.2021.3.78-105
 18. International Migrant Stock 2024. <https://www.un.org/development/desa/pd/content/international-migrant-stock> (дата обращения 15.04.2025).
 19. Adamson F., Tsourapas G. Migration Diplomacy in World Politics // *International Studies Perspectives*. 2019, vol. 20, pp. 113–128. DOI: 10.1093/isp/eky015
 20. Mid-Year Trends 2024. 2024, pp. 13. <https://www.unhcr.org/mid-year-trends-report-2024> (дата обращения 15.04.2025).
 21. World Development Report 2023. 2023, 315 p. <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2023> (дата обращения 15.04.2025).
 22. Greenhill K. When migrants become weapons. The long history and worrying future of a coercive tactic // *Foreign Affairs*. 2022, 101, no. 2, pp. 155–164. <https://www.foreignaffairs.com/articles/europe/2022-02-22/when-migrants-become-weapons> (дата обращения 15.04.2025).
 23. Adamson F., Greenhill K. Deal-making, diplomacy and transactional forced migration // *International Affairs*. 2023, vol. 99, pp. 707–725. DOI: 10.1093/ia/iad017
 24. Tsourapas G. *Migration diplomacy in the Middle East and North Africa. Power, mobility, and the state*. Manchester: Manchester University Press, 2021.
 25. Haas H., Castles S., Miller M. *The age of migration. International population movements in the modern world*. Sixth Edition. L.: RED GLOBE PRESS, 2020.
 26. Micinski N. Threats, deportability and aid: the politics of refugee rentier states and regional stability // *Security Dialogue*. 2021, vol. 54, no. 6, pp. 529–547. DOI: 10.1177/09670106211027464
 27. Lessenich S. *Neben uns die Sintflut. Die Externalisierungsgesellschaft und ihr Preis*. Berlin: Hanser Verlag, 2016.
 28. Биссон Л.С. Миграционная дипломатия: взгляд на отношения ЕС и Африки // *Современная Европа*. 2024. № 6. С. 57–67. DOI: 10.31857/S0201708324060056
Bisson L.S. EU–Africa Relations: Migration Diplomacy Approach // *Contemporary Europe*. 2024, no. 6, pp. 57–67. DOI: 10.31857/S0201708324060056 (In Russ.)
 29. Migration diplomacy: An analysis of policy approaches and instruments. *European Migration Network – OECD joint Inform*, 2024. 15 p. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-issues/migration/EMN_OECD_Inform_Migration_Diplomacy_final.pdf (дата обращения 15.04.2025).
 30. Paasche E. “Recalcitrant” and “uncooperative”: why some countries refuse to accept return of their deportees // *Migration Information Source*. 2022. <https://www.migrationpolicy.org/article/recalcitrant-uncooperative-countries-refuse-deportation> (дата обращения 15.04.2025).
 31. Cevik S., Padilha T. Measuring Soft Power: A New Global Index // *IMF Working Paper*. 2024, no. 24/212. Washington, DC: International Monetary Fund. 21 p. DOI: 10.5089/9798400289576.001
 32. Харитоновна Е.М., Бунина А.А. Образование сотрудников как дополнительный показатель географической представленности: дисбаланс в системе ООН // *Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика*. 2025. № 3. В печати.
Kharitonova E.M., Bunina A.A. Employee education as an additional indicator of geographical representation: imbalance in the UN system // *International Organisations Research Journal*. 2025, no. 3. (In Russ.)
 33. Kaya A. Migration as a leverage tool in international relations: Turkey as a case study // *Uluslararası İlişkiler*. 2020, vol. 17, no. 68, pp. 21–39. DOI: 10.33458/uidergisi.856870
 34. Solano G., Huddleston T. *Migrant Integration Policy Index 2020*. Barcelona/ Brussels: CIDOB and MPG, 2020. <https://www.mipex.eu/sites/default/files/downloads/pdf/files/a5/mipex-2020-book-a5.pdf> (дата обращения 15.04.2025).

MIGRATION POWER CENTERS IN WORLD POLITICS

I. P. Tsapenko^{a,*}, K.A. Subkhangulova^{a,**}

*^aPrimakov National Research Institute of World Economy and International Relations (IMEMO)
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: tsapenko@bk.ru*

***E-mail: ksubkhangulova@yandex.ru*

In the emerging polycentric and multi-level architecture of the world order, in addition to the supporting system of centers of power in their classical understanding, new power subsystems are being built, in particular, migration. Centers of migration power can be defined as international actors, primarily major participants in migration processes, who are capable of achieving foreign policy goals with the help of migration tools and, under specific conditions, realize this potential. The difference in migration positions – recipient, donor, transit population or combinations of these statuses – presupposes a variety of centers of power in the migration field depending on the role they play (immigration, emigration or transit). The migration status of a country is reflected in a wide range and variability of the use of persuasion tools: from the weaponization of human flows and sanctions against migration to cooperation in the field of migration and the promotion of an attractive image of the country with the help of liberal and inclusive migration policy measures. In addition to leading powers, migration force centers may also include states that acquire leadership in the subregional migration space of foreign policy in the appropriate context and time interval, which determines the mobility and variability of the configuration of migration force centers. The current development of migration and the strengthening of its connection with foreign policy processes indicate an expansion of the use of migration force and an increase in the role of migration force centers in international relations.

Keywords: international migration of population, international relations, leading power, center of power, migration force, center of migration force, instrumentalization of migration, migration partnerships, migration attractiveness of the country.

РАЗВИТИЕ СВЯЗЕЙ С ИНДУСТРИЕЙ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК НА ПРИМЕРЕ ВЕДУЩИХ УНИВЕРСИТЕТОВ США

© 2025 г. И.Г. Дежина^{а,*}

^аСколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*E-mail: i.dezhina@skoltech.ru

Поступила в редакцию 04.04.2025 г.

После доработки 20.05.2025 г.

Принята к публикации 27.05.2025 г.

Сотрудничество университетов и компаний в области исследований и разработок относится к числу тем, привлекающих постоянный интерес. Эта проблематика наиболее разработана в странах с развитыми университетско-индустриальными связями. Исследования показывают многообразие форм сотрудничества, университетских стратегий, а также роль доверия в налаживании долгосрочного партнёрства.

В статье на основе экспертных интервью со специалистами ряда ведущих университетов США, вовлечённых в установление контактов и реализацию проектов с индустрией, рассматриваются практические вопросы развития научной кооперации. В центре внимания находятся вопросы установления связей, финансирования, регулирования работы профессоров с компаниями и стимулов для такого взаимодействия. Организация научного сотрудничества меняется в направлении горизонтальной диверсификации и специализации посреднических структур, расположенных в университетах, роста разнообразия форм финансирования и унификации правил регулирования работы профессоров с индустриальными партнёрами. Стимулы к кооперации со стороны профессоров связаны не только с возможностью получения дополнительных доходов, но и с научными интересами, а также растущим престижем в академической среде подобного взаимодействия.

Ключевые слова: кооперация университетов и компаний, исследования и разработки, посреднические структуры, финансирование, стимулы, регулирование работы профессоров, США.

DOI: 10.31857/S0869587325080073, EDN: DTIBFN

Интерес к теме партнёрства университетов и компаний при проведении научных исследований не снижается даже в странах, где давно изучается этот вопрос. Неудивительно, что данная проблематика наиболее детально проработана в странах, где подобные партнёрства получили широкое распространение – США, Великобритании, а также ряде стран ЕС [1]. Постепенно растёт число исследова-

ний на материалах ведущих стран Азии, заинтересованных в развитии кооперации, в первую очередь Японии и Китая [2].

Одна из причин роста числа исследований, посвящённых научной кооперации университетов и индустрии [1, 3], состоит в трансформации миссий университетов в сторону коммерциализации исследований (третья миссия) и появлении предпринимательских университетов [4]. Концепции “третьей миссии” и предпринимательского университета выросли из практики. Третья миссия определяется как генерирование и эксплуатация знаний совместно с внешними заинтересованными сторонами и обществом в целом [5]. Таким образом, предполагается, что университет должен заниматься не только созданием, но и практическим применением новых знаний [6], а значит, становиться предпринимательским. При этом долгосрочные связи с компаниями выстраиваются, как правило, при участии посреднических структур и складываются постепенно, поскольку между партнёрами должно возникнуть доверие [7, 8].



ДЕЖИНА Ирина Геннадиевна — доктор экономических наук, руководитель департамента анализа научно-технологического развития Сколтеха.

Университеты заинтересованы участвовать в партнёрствах с компаниями, чтобы получать дополнительное финансирование, знания, публиковать результаты исследований, а также вносить вклад в региональную и национальную экономику [9–12]. Компании сотрудничают с университетами с целью повысить свои технологические возможности, разработать новые продукты и процессы, разделить риски и финансовые затраты.

Бизнес является основным источником финансирования исследований и разработок в большинстве стран с развитыми научными комплексами и одновременно выступает основным исполнителем НИОКР. На примере США (табл. 1) видно, что предпринимательский сектор финансирует 2/3 НИОКР страны, и сам выполняет 78% всех исследований и разработок, причём в динамике доля этого сектора как источника финансирования, так и исполнителя работ постоянно растёт. Университеты также вкладывают небольшие собственные средства в исследования и разработки (на уровне 3% суммарных национальных расходов на науку), а выполняют около 10% от общего объёма исследований. При этом доля университетов как исполнителей работ постепенно падает.

Для университетов основным источником финансирования НИОКР выступают средства государственного бюджета (федерального и штатов) и собственные средства (табл. 2). При этом бюджетные средства составляют около 60%. Сравнительно значима роль “других источников”, к которым относятся средства некоммерческих организаций и зарубежное финансирование. На бизнес-сектор приходится всего около 6% суммарного финансирования исследований и разработок в университетах. В некоторых ведущих университетах доля бизнес-сектора несколько выше — 7–9%. Например, в Стэнфордском университете бизнес спонсирует около 7% проводимых исследований. При этом доля государства в поддержке НИОКР там также выше среднего и составляет около 75%¹.

Стратегии университетов и формы сотрудничества. Подход университетов к взаимодействию с индустрией может базироваться на сочетании нескольких целей. Возможна стратегия генерации доходов, когда университет стремится к максимальной финансовой выгоде от сотрудничества. Показателями успеха становятся доходы от контрактов на проведение исследований, от лицензионных соглашений или продажи патентов. Другое направление связано с поддержкой преподавателей. В этом случае внимание в первую очередь уделяют получению финансирования на научные исследования, а не доходам от лицензирования или создания стартапов. Наконец,

в центре стратегии может быть задача местного развития, разработка технологий в интересах компаний региона. Тогда внимание сосредоточено на создании новых рабочих мест за счёт развития стартапов преподавателей и студентов [13].

С точки зрения классификации форм кооперации хорошо разработанным можно считать подход, представленный в работе “Exploring university-industry collaboration in research centres” (Изучение сотрудничества между университетами и промышленностью в научно-исследовательских центрах) [14]. Авторы выделяют четыре формы кооперации. Первая — это дистанционное сотрудничество, при котором компания выделяет средства, а академические партнёры выполняют исследования. В этом случае взаимодействие между университетом и компанией довольно слабое. Вторая форма — специальное сотрудничество, когда индустриальный партнёр определяет и контролирует задачи, которые должны быть выполнены в университете. Как правило, это исследования на основе контрактов. Третья форма кооперации называется трансляционной и представляет собой два параллельных исследовательских процесса. Один из них, заключающийся в проведении исследований с целью публикации работ, контролирует университет. Второй, задача которого — исследования для разработки новых продуктов, осуществляется под контролем промышленности. Два эти процесса взаимозависимы, имея в виду схожую тематику и обмен знаниями и ресурсами. Наконец, выделяется развитое сотрудничество, когда академические и индустриальные партнёры занимаются исследовательскими задачами, которые важны им обоим. Стороны совместно разрабатывают исследовательскую программу, организуют исследования и используют результаты. Важно отметить, что при установлении партнёрских отношений, независимо от их формы, заметную роль играют посреднические организации университетов в качестве фасилитаторов, обеспечивающих успешную коммуникацию между компаниями и университетскими исследователями [15]. Основные характеристики выделенных форм сотрудничества представлены в таблице 3.

Формы сотрудничества определяют их финансовую основу. В целом можно выделить три основных способа финансирования исследований со стороны компаний: спонсируемый проект (контракт), членские взносы для участия в партнёрских программах университета, дар, представляющий собой пожертвование профессорам / лабораториям.

Контракт — это одна из наиболее известных форм финансирования, когда компания выделяет средства на исследования по конкретной тематике, выполняемые в университете, и, по сути, руководит работой. Предварительно устанавливается срок выполнения проекта, согласовываются права на интеллектуальную собственность, проводится регулярная проверка промежуточных результатов.

¹ Wang E. Behind the \$1.98 billion in Stanford’s external research funds // The Stanford Daily, Feb. 1, 2024. <https://stanforddaily.com/2024/02/01/behind-the-1-98-billion-in-stanford-external-research-funds/>

Таблица 1. Распределение затрат на НИОКР в США по источникам финансирования и по секторам-исполнителям, %

Год	Предпринимательский сектор	Федеральное правительство	Сектор высшего образования	Другие
Распределение по источникам финансирования НИОКР				
2015	67.4	24.2	3.5	4.9
2016	69.1	22.7	3.6	4.7
2017	69.8	22.1	3.6	4.5
2018	70.6	21.7	3.5	4.2
2019	72.5	20.4	3.3	3.9
2020	72.6	20.7	3.1	3.6
2021	74.9	18.7	3.0	3.4
2022	76.0	18.0	2.9	3.1
Распределение по исполнителям НИОКР				
Год	Предпринимательский сектор	Федеральное правительство	Сектор высшего образования	Другие
2015	72.0	10.7	13.1	4.3
2016	72.8	9.8	13.0	4.4
2017	73.3	9.5	12.8	4.4
2018	73.8	9.7	12.4	4.2
2019	74.9	9.4	11.7	4.0
2020	75.8	9.1	11.3	3.9
2021	77.1	8.5	10.9	3.5
2022	78.2	8.3	10.3	3.2

Источник: Research and Development: U.S. Trends and International Comparisons. 2024. <https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20246/trends-in-u-s-r-d-performance>

Таблица 2. Исследования и разработки в секторе высшего образования по источникам финансирования, %

Год	Федеральный бюджет	Средства штатов	Средства университетов	Средства бизнеса	Другие источники
2011	62.5	5.9	19.3	4.8	7.5
2012	61.1	5.6	20.7	5.0	7.6
2013	58.9	5.5	22.3	5.3	8.0
2014	56.5	5.8	23.4	5.5	8.8
2015	55.2	5.6	24.2	5.8	9.2
2016	54.0	5.6	25.0	5.9	9.5
2017	53.6	5.6	25.1	5.9	9.9
2018	53.0	5.4	25.5	6.0	10.1
2019	53.3	5.4	25.2	6.0	10.1
2020	53.4	5.3	25.5	6.1	9.7
2021	54.8	5.3	25.0	5.7	9.2

Источник: Academic R&D. <https://nces.nsf.gov/pubs/nsb202326/funding-sources-of-academic-r-d>

Таблица 3. Формы научной кооперации между университетами и компаниями

Форма сотрудничества	Ведущий партнёр	Суть кооперации	Возможная финансовая поддержка от индустрии
Дистанционное	Университет	Исследования для получения научных результатов	Безвозмездная финансовая помощь (дары)
Специальное	Индустрия	Исследования для получения нового продукта	Контракт
Трансляционное	Индустрия и университет	Параллельные исследования для получения научных результатов и новых продуктов	Каждая сторона выполняет исследования за счёт собственных средств, либо создавая партнёрские программы
Развитое	Индустрия и университет	Совместные исследования для получения научных результатов и новых продуктов	Партнёрские программы

Источник: составлено автором.

Партнёрские программы формируются совместно университетами и компаниями с главной целью — установить отношения и обмен идеями. В этом случае исследования проводятся под руководством профессоров на предконкурентных стадиях. Компании платят ежегодные взносы для поддержки исследований и проведения мероприятий членами партнерских программ.

Наконец, компании могут выделять средства в виде дара конкретному профессору или лаборатории. В этом случае финансирование не привязано к результату и официальной отчётности не требуется. Направленность исследований определяют профессора, и она часто совпадает с уже ведущимися работами. По итогам выполнения проектов допустимы открытые публикации.

В данной работе рассматриваются практики взаимодействия ведущих американских университетов с крупными компаниями в области исследований и разработок. Анализ базируется на экспертных интервью с сотрудниками структур, которые занимаются связями с индустрией, а также с профессорами, имеющими опыт сотрудничества с компаниями.

Современные особенности научного партнёрства. Исследование проводилось в 2024 г. на основе экспертных интервью со специалистами, работающими в таких ведущих университетах США, как Стэнфордский университет, Массачусетский технологический институт, Чикагский Северо-Западный университет и Политехнический институт Ренселера. Работа информантов была связана либо с установлением и поддержанием контактов с промышленностью, либо с непосредственным участием в совместных исследованиях с компаниями. Всего было проведено 11 экспертных интервью.

Формальной анкеты не было, обсуждение выстраивалось в зависимости от той роли, которую играл информант в университетско-промышленной научной кооперации. В центре внимания было только научное сотрудничество, образовательные формы партнёрства не обсуждались.

Среди рассматриваемых университетов два (Стэнфордский университет и Массачусетский технологический институт) имеют давние и тесные связи с индустриальными кластерами (с Кремниевой долиной и Маршрутом 128 соответственно). Опыт их взаимодействия с промышленностью имеет большое значение ещё и потому, что эти университеты влияют на культуру и восприятие университетско-индустриальных связей в более широкой академической и бизнес-среде [16, 17]. Сотрудничество Стэнфорда с компаниями Кремниевой долины даёт возможность студентам работать в крупных корпорациях и учреждать стартапы. Университет также поощряет создание преподавателями собственных компаний, что стало важным элементом культуры Кремниевой долины [18]. Похожие стимулы действуют и в Массачусетском технологическом институте, известном тесным взаимодействием с компаниями кластера Маршрут 128 и историей создания стартапов, которые впоследствии оказали значительное влияние на появление новых технологий и экономический рост [19]. Особую роль в Массачусетском технологическом институте и Стэнфорде играют офисы трансфера результатов научных исследований в продукты и технологии [20].

В интервью были затронуты следующие темы: (1) подходы, которые используют посреднические структуры университета по связям с компаниями в области НИОКР; (2) формы финансирования

исследований и разработок со стороны компаний; (3) регулирование работы профессоров с компаниями; (4) стимулы, побуждающие профессоров к сотрудничеству.

Роль посреднических структур. В качестве примера структуры по налаживанию связей с крупным бизнесом релевантным является опыт подразделения mediaX в Стэнфордском университете. Его миссия состояла в налаживании связей между учёными и лидерами из влиятельных компаний для совместного обсуждения и решения вопросов, важных как для академических кругов, так и промышленности. Подразделение mediaX взаимодействовало более чем с двумя десятками междисциплинарных лабораторий Стэнфорда.

В диалоге с представителями отрасли определялись темы исследований, отвечающие общим интересам. Для этого были организованы тематические беседы, семинары и мастер-классы, а также неформальные встречи. Темы обсуждения относились преимущественно к области видения перспективных тематик в среднесрочном периоде. Участниками обсуждений со стороны университета были в первую очередь не административные руководители разных уровней, а главы лабораторий, преподаватели и аспиранты.

Компаниям, которые хотели сотрудничать с mediaX, предлагалось вносить членский взнос для продолжения взаимодействия. Эти средства использовались для финансирования так называемых стартовых проектов, которые выполняли исследователи университетов, как правило, по междисциплинарной тематике, отобранной при участии компаний. Стартовые гранты mediaX обеспечивали прямую связь с промышленностью и возможность, в первую очередь аспирантам, исследовать новые области. Они позволяли поддерживать исследования аспирантов в течение летнего семестра или даже целого года. Этот подход отличался от традиционного академического финансирования, которое требует доказанного опыта успешной работы, наличия публикаций и прошлых грантов.

План сотрудничества с каждой компанией пересматривался ежегодно или чаще с целью обновления запросов и корректировки тематик. По сути, mediaX выступало в роли катализатора взаимодействий, чтобы донести актуальность исследований до различных участников и урегулировать многочисленные разногласия, которые между ними возникали. (Они связаны с культурными нормами, сроками проведения исследований, планированием встреч.) По оценкам, требуется не менее четырёх лет, чтобы возникло устойчивое взаимодействие с компаниями, основанное на взаимном доверии.

В связи с тем, что тема установления доверия и взаимопонимания стала широко признанной и на факультетах университета появились подразделения, занимающиеся аналогичной работой,

в 2022 г. mediaX было закрыто. Таким образом, из централизованной эта деятельность преобразовалась в горизонтальную сетевую.

На уровне школ (факультетов) действуют свои структуры по связям с индустрией. Есть офисы, занимающиеся технологиями, создаваемыми за счёт средств федерального правительства, офисы по работе со спонсорскими программами, центры трансляционных исследований (включая клинические испытания), а также офисы по корпоративным связям. Такие структуры действуют, как правило, при медицинских и инженерных школах. Так, в Стэнфорде именно такие две школы — инженерная и медицинская — обеспечивают 90% финансирования от бизнеса. Остальные факультеты и школы мало взаимодействуют с компаниями, в основном в форме организации практики для студентов, а не выполнения научных исследований.

Интервью со специалистами офиса по корпоративным связям в Стэнфордском университете показали, что он является нетипичным в том смысле, что именно компании ищут возможности сотрудничать с профессорами и студентами, и первыми проявляют инициативу. При этом круг партнёров ограничен. По мнению одного из руководителей офиса, такая ситуация связана с тем, что работать со Стэнфордом может не каждая компания, поскольку услуги профессоров университета дорогие. Среди индустриальных партнёров в основном те, чей доход не менее 1 млрд долл. в год.

Офис придерживается следующей политики в области прав на интеллектуальную собственность: 100% результатов исследований принадлежат университету, а компания может купить лицензию. Для компаний это приемлемо: они рассматривают инвестиции в исследования как развитие бизнеса, а значит, доходы появятся вследствие дальнейшей коммерциализации продукта. Иное регулирование применяется тогда, когда и профессор, и компания совместно участвовали в проведении исследований. На практике это может быть реализовано в форме временной работы в университете специалиста компании на позиции приглашённого исследователя.

По мнению руководителей офиса, для успеха в работе с индустрией прежде всего следует:

- добиться того, чтобы компания инвестировала не только деньги, но и своё время в совместную деятельность: компания должна выделить конкретных специалистов, которые будут регулярно участвовать во встречах и семинарах;
- постепенно переходить от отдельных небольших задач к комплексным проектам, поскольку цель — не только получить финансирование, но и выстроить долгосрочные отношения.

Формы финансирования совместной работы университетов и компаний. В партнёрстве университетов и компаний основным источником являются

частные средства, но может привлекаться и бюджетное финансирование — через участие университетов и компаний в федеральных программах.

Как отмечалось в обзоре литературы, частное финансирование может поступать в виде даров (безвозмездной помощи), членских взносов в партнёрских программах, а также в рамках контрактов. Партнёрские программы и дары — менее распространённые формы, чем оплата по контрактам. Так, в случае Стэнфордской инженерной школы соотношение разных форм финансирования складывается следующим образом: 50% составляют спонсируемые проекты (контракты), 25% — дары, 25% — членские взносы в партнёрские программы.

Партнёрские программы — это своего рода клуб, компании-члены которого могут участвовать в ежегодных заседаниях, встречах, ежемесячных вебинарах и иных мероприятиях. При этом профессора и исследователи выполняют проекты на средства, полученные благодаря членским взносам. Партнёрские программы дают также компаниям доступ к оборудованию университетов.

Размер членского взноса зависит от научно-технологической области. Самые скромные членские взносы в программах компьютерных наук, так как они идут в основном на зарплату. В более капиталоемких областях размер членского взноса варьируется на уровне 100–250 тыс. долл. в год. Членские взносы делятся на две части по направленности трат. Одна часть идёт на поддержку исследований профессоров, другая покрывает административные расходы университета по ведению программы.

Для определения тематической направленности партнёрских программ в университете обычно формируются группы из профессоров и преподавателей, имеющих опыт предпринимательства. Они решают, над чем можно работать совместно с индустрией и что потенциально может быть ей интересно. Как правило, тематика должна быть такой, чтобы был понятен эффект для общества. Примеры тематик индустриальных партнёрских программ в составе инженерной школы Стэнфорда представлены в таблице 4.

Таблица 4. Партнёрские программы с индустрией в составе инженерной школы Стэнфорда

Название программы	Перевод на русский язык
Advanced Financial Technologies Laboratory	Лаборатория передовых финансовых технологий
AeroAstro Industrial Affiliates Program	Партнёрская программа “АэроАстро”
Agile Hardware Affiliates Program	Партнёрская программа адаптивного аппаратного обеспечения
AI for Health	ИИ для здравоохранения
AI Safety	Безопасность ИИ
Artificial Intelligence Lab (SAIL)	Лаборатория искусственного интеллекта
Automotive Research at Stanford (CARS)	Исследования в области автомобилестроения в Стэнфорде
Bitts & Watts	Устойчивые решения в энергетике
Blume Center: Earthquake Engineering Affiliates	Центр Блюма: партнёрство по сейсмостойкому строительству
Compression Forum	Форум по компрессии
Computer Forum Affiliates Program	Партнёрская программа компьютерного форума
Computer Science Bridge Affiliate Program	Партнёрская программа “Мост” в компьютерных науках
Construction Institute	Институт строительства
Data Analysis for What’s Next (DAWN)	Анализ данных для будущего (DAWN)
Data Science Initiative	Инициатива по науке о данных
Design Research	Исследования в области дизайна
Digital Cities Affiliate Program	Партнёрская программа “Цифровые города”
Distributed Trust Initiative (DTI)	Инициатива распределённого доверия (крипто-исследования)
E-Wear	Функциональная одежда для геймеров

Окончание таблицы 4 на стр. 77.

Таблица 4. (окончание)

Название программы	Перевод на русский язык
Energy Modeling Forum	Форум по энергетическому моделированию
Digital Currency Lab	Лаборатория цифровой валюты
Global Projects Center (GPC)	Центр глобальных проектов (финансирование, развитие и управление критической инфраструктурой)
ICME Education Affiliate Program	Партнёрская программа по образованию в области компьютерных наук и математики
Image Systems Engineering	Инженерия систем изображений
Integrated Facility Engineering	Интегрированное проектирование объектов
Magnetic Nanotechnology	Магнитные нанотехнологии
MS&E Career Collaborative Program	Партнёрская магистерская программа в области инженерных наук
Nanoscale Prototyping Lab Affiliate Program	Партнёрская программа “Лаборатория по созданию наноразмерных прототипов”
National Performance of Dams Program	Национальная программа по эффективности плотин
Nonvolatile Memory Technology Research Initiative	Инициатива по исследованию технологий энергонезависимой памяти
Open Virtual Assistant Lab	Лаборатория открытого виртуального помощника
Photonics Research Center	Исследовательский центр фотоники
Platform Lab	Лаборатория платформ
Position Navigation and Time	Позиционная навигация и время
Re-inventing the Nation’s Urban Water Infrastructure	Переосмысление городской водной инфраструктуры страны
SUNCAT (Center for Interface Science and Catalysis)	Центр науки об интерфейсах и катализа
Sustainable Development and Global Competitiveness	Устойчивое развитие и глобальная конкурентоспособность
System X Alliance (sensing, computing and communication)	Альянс System X (сенсорные, вычислительные и коммуникационные технологии)
Teaching Design Thinking	Обучение проектному мышлению
Thermal & Fluid Sciences Affiliates	Партнёрство в области термальных и жидкостных исследований
Urban Resilience Initiative	Инициатива по повышению устойчивости городов
US-Asia Technology Management Center	Американо-азиатский центр управления технологиями

Источник: Industrial Affiliate Programs. Stanford University. <https://cfr.stanford.edu/industrial-affiliate-programs>

Регулирование работы профессоров с компаниями. Регулирование развивается по двум основным направлениям. Первое: политика в отношении совмещения становится всё более зарегулированной, потому что такая занятость может стать источником конфликта интересов. Второе: регулирование становится более унифицированным, появляются нормы, которые должны соблюдать все университеты. Так, общепринятой стала практика, когда профессора могут тратить до 20% (1 день в неделю) своего рабочего времени на консалтинг в компаниях [21].

По мнению некоторых информантов, консалтингом занимаются 30–40% профессоров. Однако постепенно он вытесняется модой на создание стартапов.

Если профессор создал свою компанию и хочет её возглавить, то он должен оформить в университете отпуск за свой счёт продолжительностью до двух лет и не чаще, чем раз в семь лет. На это время позиция за профессором сохраняется. Далее можно оставаться в компании советником или членом Наблюдательного совета. Другого варианта быть не может, поскольку иначе возникает конфликт интересов.

Согласно правилам Стэнфорда², «для должности в компании нельзя использовать такие термины, как “сотрудник” или “вице-президент”; с другой стороны, можно использовать наименования “советник” или “консультант”, например, “главный научный советник” или “главный технический консультант”». Помимо названия должности, достаточно строго регулируется авторство в публикациях, которые стали результатом работы с компаниями: “Если преподаватель указан в качестве автора в какой-либо публикации, являющейся результатом оказания консультационных услуг, в статье должно быть указано, что работа была выполнена в качестве платного консультанта и не является частью обязанностей и ответственности сотрудника Стэнфорда”.

Стоит отметить, что регулирование в Стэнфорде более жёсткое, чем, например, в Массачусетском технологическом институте, Чикагском университете или Беркли, где ограничения и принципы учёта работы преподавателей в компаниях прописаны менее детально. Так, регулирование в Беркли касается только подсчёта часов: “Преподаватели, работающие на полную ставку и имеющие девятимесячный контракт, могут заниматься оплачиваемой консультационной деятельностью 39 дней в течение учебного года. Преподаватели, работающие на полную ставку на основе годового контракта, могут заниматься оплачиваемым консультированием 48 дней в течение всего года. Члены факультета могут консультировать в течение полного рабочего дня в летние месяцы, когда Университет не выплачивает им другую зарплату”³.

Стимулы для профессоров. Стимулы работать с индустрией для профессоров можно разделить на финансовые, научные и социальные. Финансовые стимулы связаны с тем, что профессор должен, во-первых, найти средства себе на заработную плату на три летних месяца, поскольку в США зарплата профессора, как правило, гарантирована только 9 месяцев в году, и, во-вторых, обеспечить финансирование аспирантов, поскольку именно профессор-руководитель отвечает за поиск средств на их поддержку.

История Стэнфорда демонстрирует важность финансовых мотивов. Низкая заработная плата профессоров на начальных этапах становления университета в сочетании со свободой поиска дополнительных заработков в пределах своей профессиональной деятельности стала стимулом развития связей с индустрией. Вот сюжет из истории Стэнфорда.

До Второй мировой войны из-за постоянных бюджетных ограничений профессорам Стэнфорда недоплачивали, что затрудняло наём и удержание персонала. Например, в 1945–1946 гг. средняя минимальная зарплата профессора Стэнфорда составляла 4.5 тыс. долл., а в Университете Беркли — 6 тыс. долл., и оба показателя были ниже, чем 10–12 тыс. долл., которые платили в ведущих университетах Восточного побережья [22]. Помимо небольшой зарплаты, преподаватели Стэнфорда не получали достаточной поддержки для проведения исследований. По данным за 1927–1928 гг., Стэнфорд выделил всего 3.3 тыс. долл. на исследования, в то время как Университет Беркли — 112 тыс. долл., а Массачусетский технологический институт — более 200 тыс. долл. [23]. Поэтому руководство Стэнфорда разрешило профессорам одновременно работать с компаниями и даже быть совместителями. Университет поощрял передачу технологий, не вмешиваясь в работу профессоров. Только в 1994 г. в политику университета были внесены изменения, требующие от всех сотрудников более подробно раскрывать информацию о сотрудничестве с компаниями и о полученных изобретениях [24].

В целом в начале 1990-х гг. после сокращения государственного финансирования американских университетов многие из них стали искать поддержки от промышленности, в том числе на проведение исследований. После этого распространилась точка зрения, что расширение кооперации университетов и компаний стало реакцией на урезание государственного финансирования исследований [25].

Научные стимулы к взаимодействию сотрудников университетов с компаниями связаны с тем, что совместная деятельность даёт возможность преподавателям и исследователям расширить профессиональный кругозор. Большинство из них имеет достаточно узкую специализацию, а общение с представителями индустрии помогает сформировать перспективное видение развития своей научной области.

Наконец, есть и социальные стимулы к научной кооперации. Они наиболее заметны в таком виде деятельности профессоров, как создание стартапов. Наличие стартапов стало одним из критериев успеха профессора. Более того, этот факт может учитываться при определении размера зарплаты. Иметь стартап стало престижно, причём негативные результаты деятельности не вредят, поскольку трактуются как приобретение опыта. В целом наличие кооперации с индустрией стало доказательством профессионального уровня преподавателя университета.

* * *

Развитие связей университетов с компаниями происходит в направлении децентрализации — появлении сети специализированных подразделений внутри университетов. Это особенно характерно для

² Stanford University. Consulting and Other Outside Professional Activities by Members of the Academic Council and University Medical Line Faculty. <https://doresearch.stanford.edu/policies/research-policy-handbook/conflicts-commitment-and-interest/consulting-and-other-outside-professional-activities-members-academic-council-and-medical-center-line-faculty>

³ Quick Guide to Outside Consulting for UC Berkeley Faculty. Outside Consulting Agreements. <https://spo.berkeley.edu/guide/consultquick.html>

университетов, где налажены долгосрочные связи с компаниями. При этом свой вклад в данный процесс вносят и компании. Они предпочитают применять не вертикальный, а горизонтальный подход в налаживании контактов с университетами, заинтересованы во взаимодействиях не с административным персоналом, а с теми, кто непосредственно выполняет исследования, включая аспирантов. В свою очередь, аспиранты и постдоки играют важную роль в кооперации с индустрией, поскольку выполняют непосредственную работу и одновременно наравне со старшими коллегами участвуют в обсуждении перспективных задач.

Основная цель посреднических структур, действующих внутри университетов (школ), состоит в развитии постоянных контактов с компаниями, что позволяет не только получать разовые заказы на исследования и разработки, но совместно определять перспективные области. Консалтинг профессоров и создание ими стартапов часто становятся первым шагом к более тесному сотрудничеству с индустрией. Учреждение стартапов уже воспринимается как норма в профессорско-преподавательской среде, как элемент престижа и признак уровня квалификации.

Университеты не рассчитывают, что все подразделения и школы будут вовлечены в развитие связей с компаниями в области научных исследований. Как показывает практика, сотрудничество в основном происходит на базе инженерных и медицинских школ.

Работа профессоров с компаниями в форме консалтинга и в случае создания стартапов жёстко и детально регулируется университетами. Есть установленные и становящиеся всё более общепринятыми нормы и ограничения в части допустимого времени, которое можно потратить на взаимодействие с бизнесом.

Среди стимулов к сотрудничеству профессоров с компаниями можно выделить финансовые, научные и социальные. Финансовые стимулы связаны с необходимостью поиска средств на зарплату в летние месяцы и поддержку аспирантов. Научные стимулы состоят в том, что через общение с представителями компаний можно чётче понять, в каком направлении стоит развивать собственные исследования, чтобы их результаты приносили пользу обществу. Социальные стимулы появились в связи с растущим престижем работы с индустрией как индикатором профессионального уровня.

Финансирование исследований и разработок со стороны индустрии характеризуется вариативностью и гибкостью. Его формы зависят от того, какие задачи решает компания: выполнение исследований по тематике, актуальной для компаний на текущий момент времени (контракты), определение будущих трендов (партнёрские программы) либо поддержка высокопродуктивных профессо-

ров и лабораторий, занимающихся важными для компаний направлениями исследований.

При всей значимости взаимодействия науки с индустрией финансирование исследований в университетах со стороны индустрии незначительно в сравнении с государственной (бюджетной) поддержкой. Связи с индустрией важны университету не столько в качестве серьёзного источника средств, сколько для продвижения результатов исследований и трансфера технологий в экономику. Это рассматривается как возврат средств налогоплательщиков, за счёт которых в конечном итоге финансируются научные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chen X., Zhang G.* Mapping the Research on University-Industry Collaborative Innovation of Individuals: A Scientometric Analysis // *IEEE Access*. 2023, vol. 11, pp. 86318–86334. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3304902
2. *Romero-Sánchez A., Perdomo-Charry G., Burbano-Vallejo E.L.* Exploring the entrepreneurial landscape of university-industry collaboration on public university spin-off creation: A systematic literature review // *Heliyon*. 2024, vol. 10, no. 19, e27258. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27258>
3. *Li J., Gong Y., Li H.* Looking Back to Move Forward: Bibliometric and Visual Analysis of Knowledge Transfer in University-Industry Collaboration // *IEEE Access*. 2024, vol. 12, pp. 32278–32297. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3371258.
4. *Ghanadinezhad F., Ghane M.R.* Analyzing Review Studies and Bibliometrics of University-Industry Interaction Using Scoping Review 1 // *International Journal of Information Science and Management*. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 85–110. DOI: 10.22034/ijism.2024.2022906.1400
5. *Secundo G., Elena-Perez S., Martinaitis Ž., Leitner K.H.* An Intellectual Capital framework to measure universities' third mission activities // *Technological Forecasting and Social Change*. 2017, vol. 123, pp. 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.12.013>
6. *Laredo P.* Revisiting the third mission of universities: Toward a renewed categorization of university activities? // *Higher Education Policy*. 2007, vol. 20, no. 4, pp. 441–456. <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.hep.8300169>
7. *Alexander A., Martin D.P., Manolchev C., Miller K.* University-industry collaboration: using meta-rules to overcome barriers to knowledge transfer // *The Journal of Technology Transfer*. 2020, vol. 45, no. 2, pp. 371–392. <https://doi.org/10.1007/s10961-018-9685-1>
8. *Lee K.-J.* From interpersonal networks to inter-organizational alliances for university-industry collaborations in Japan: the case of the Tokyo Institute of Technology // *R&D Management*. 2011, no. 41, pp. 190–201. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2011.00633.x>

9. *Bastos E.C., Sengik A.R., Tello-Gamarra J.* Fifty years of University-industry collaboration: a global bibliometrics overview // *Science and Public Policy*. 2021, vol. 48, no. 2, pp. 177–199. <https://doi.org/10.1093/scipol/scaa077>
10. *Schaeffer P.R., Guerrero M., Fischer B.B.* Mutualism in ecosystems of innovation and entrepreneurship: A bidirectional perspective on universities' linkages // *Journal of Business Research*. 2021, no. 134, pp. 184–197. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.05.039
11. *Bonaccorsi A.* Addressing the disenchantment: Universities and regional development in peripheral regions // *Journal of Economic Policy Reform*. 2017, vol. 20, no. 4, pp. 293–320. DOI: 10.1080/17487870.2016.1212711
12. *Fischer B.B., Schaeffer P.R., Vonortas N.S.* Evolution of university-industry collaboration in Brazil from a technology upgrading perspective // *Technological Forecasting and Social Change*. 2019, no. 145, pp. 330–340. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.05.001
13. *Szmal A.* Knowledge transfer activities in university. Silesian University of Technology. 2024. <https://managementpapers.polsl.pl/wp-content/uploads/2024/02/189-Szmal.pdf>
14. *Lind F., Styhre A., Aabo L.* Exploring university-industry collaboration in research centres // *European Journal of Innovation Management*. 2013, vol. 16, no. 1, pp. 70–91. <https://doi.org/10.1108/14601061311292869>
15. *Canhoto A.I., Quinton S., Jackson P., Dibb S.* The co-production of value in digital, university-industry R&D collaborative projects // *Industrial Marketing Management*. 2016, vol. 56, pp. 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.03.010>
16. *Saxenian A.* Inside-out: regional networks and industrial adaptation in Silicon Valley and Route 128 / *The sociology of economic life*. Routledge, 2018. P. 357–374.
17. *Kenney M., von Burg U.* Technology, entrepreneurship and path dependence: industrial clustering in Silicon Valley and Route 128 // *Industrial and Corporate Change*. 1999, vol. 8, no. 1, pp. 67–103. <https://doi.org/10.1093/icc/8.1.67>
18. *Etzkowitz H.* Entrepreneurial university icon: Stanford and Silicon Valley as innovation and natural ecosystem // *Industry and Higher Education*. 2022, vol. 36, no. 4, pp. 361–380. <https://doi.org/10.1177/09504222221109504>
19. *Stijn N., Rijnsoever F.J., Veelen M.* Exploring the motives and practices of university-start-up interaction: evidence from Route 128 // *The Journal of Technology Transfer*. 2018, vol. 43, no. 3, pp. 674–713. DOI: 10.1007/s10961-017-9625-5
20. *Windeler A., Jungmann R.* Complex innovation, organizations, and fields: Toward the organized transformation of today's innovation societies // *Current Sociology*. 2022, vol. 71, no. 7, pp. 1293–1311. <https://doi.org/10.1177/00113921221078042>
21. *Amara N., Landry R., Halilem N.* Faculty consulting in natural sciences and engineering: Between formal and informal knowledge transfer // *Higher Education*. 2013, vol. 65, no. 3, pp. 359–384. <https://doi.org/10.1007/s10734-012-9549-9>
22. *Lowen R.* Creating the Cold War University. University of California Press, Berkeley, 1997.
23. *Matkin G.W.* Technology Transfer and the University. New York: Macmillan, 1990.
24. *Kenney M., Goe W.R.* The role of social embeddedness in professorial entrepreneurship: a comparison of electrical engineering and computer science at UC Berkeley and Stanford // *Research Policy*. 2004, vol. 33, no. 5, pp. 691–707. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2003.11.001>
25. *Wright M., Lockett A., Clarysse B., Mustar P.* Academic Entrepreneurship in Europe. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Ltd, 2008.

DEVELOPING LINKS WITH INDUSTRY IN RESEARCH AND DEVELOPMENT: THE EXAMPLE OF LEADING US UNIVERSITIES

I.G. Dezhina^{a,*}

^a*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: i.dezhina@skoltech.ru*

The topic of university-industry research cooperation remains a persistent interest among the scientific community. Countries with well-developed university-industry links have conducted extensive research on the topic. A comprehensive literature review reveals a diversity of cooperative models, with universities employing diverse strategies to cultivate lasting partnerships. A seminal aspect of this research is the emphasis on trust as a pivotal factor in fostering university-industry cooperation.

Drawing on interviews with experts from leading U.S. universities involved in establishing contacts and implementing projects with industry, this article explores the practical challenges of fostering scientific cooperation. The study emphasizes networking, industrial funding, the regulation of professors' work with companies and incentives for such cooperation.

The organization of scientific cooperation is evolving towards horizontal diversification and specialization of university-based intermediary structures, an increase in the diversity of funding forms, and the unification of rules for regulating professors' work with industrial partners. The incentives for professors to engage in such cooperation are not only related to the potential for additional income but also to scientific interests and the growing prestige of such interactions within the academic community.

Keywords: university-industry cooperation, research and development, intermediary structures, funding, incentives, regulation of professors' work, USA.

КУЛИКОВСКАЯ БИТВА В КОНТЕКСТЕ ОТНОШЕНИЙ РУСИ И ОРДЫ ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XIV В.

К 645-ЛЕТИЮ БИТВЫ НА КУЛИКОВОМ ПОЛЕ

© 2025 г. А.А. Горский^{а,*}

^аИнститут российской истории РАН, Москва, Россия

*E-mail:gor-ks@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.01.2025 г.

После доработки 28.01.2025 г.

Принята к публикации 01.02.2025 г.

Каково значение Куликовской битвы в развитии отношений русских земель и Золотой Орды? По мнению автора статьи, победа великого князя Дмитрия Ивановича над узурпировавшим власть в Орде Мамаем для людей того времени была отражением конкретного нашествия, а не свержением иноземной власти вообще. Последующий конфликт — с законным ханом Тохтамышем — завершился признанием последним наследственной принадлежности московским князьям великого княжения всея Руси (Владимирского). Именно закрепление за собой и своими потомками великого княжения было главной политической целью Дмитрия Донского. Битва на Куликовом поле стала самой значительной и яркой вехой на этом пути. Главное же следствие объединения Московского и великого Владимирского княжеств — создание основы единого Русского государства — России.

Ключевые слова: Куликовская битва, Дмитрий Донской, Золотая Орда, Мамай, Тохтамыш, великое княжение.

DOI: 10.31857/S0869587325080084, **EDN:** DTIKCD

В сентябре 2025 г. исполняется 645 лет со дня битвы на Куликовом поле. В ней великий князь московский Дмитрий Иванович разгромил войско правителя Золотой Орды Мамай. Эта победа на столетия стала символом воинской доблести.

Согласно утвердившейся в массовом историческом сознании трактовке событий, московский князь Дмитрий Иванович, внук Ивана Калиты, бросил открытый вызов Орде. Противостояние Москвы с Ордой, начавшееся в 1374 г., завершилось победой на Кули-

ковом поле в верховьях Дона 8 сентября 1380 г. Однако через два года, в 1382 г., новый правитель Орды хан Тохтамыш совершил поход на Русь, сумел разорить Москву, и зависимость от Орды была восстановлена, выплата дани возобновлена. Получается, что за свержением “ига” (как в Новое Время стало принято называть систему зависимости русских земель от Орды) в 1380 г. последовало его возрождение в 1382 г. Однако такая трактовка порождает ряд вопросов.

Вторая половина XIV столетия была временем падения власти потомков Чингисхана в ряде регионов Евразии. В 1350-е годы прекратило своё существование государство Хулагуидов — потомков хана Хулагу, занимавшее пространство Ирана и Закавказья, к власти на этих территориях вернулись правители местного происхождения. В 1360-е годы была свергнута монгольская династия Юань в Китае, к власти пришла китайская династия Мин. Казалось бы, и деятельность Дмитрия Донского надо рассматривать в контексте этих событий. Однако отличия очевидны.

Между признанием русскими князьями зависимости от монгольских ханов (1240-е годы) и разры-



ГОРСКИЙ Антон Анатольевич — доктор исторических наук, профессор, заместитель директора ИРИ РАН.

вом Дмитрием Ивановичем вассальных отношений с Мамаем (это случилось в 1374 г.) прошло около 130 лет. Между походом Тохтамыша на Москву 1382 г. и ликвидацией ордынской зависимости (события 1472–1480 гг. [1, с. 152–171]) минуло без малого 100 лет, то есть почти столько же. Если считать, что Тохтамыш восстановил свергнутое “иго”, то почему оно продержалось после этого столь долго, причём в условиях, когда Орда ослабевала, а к середине XV в. и вовсе распалась на несколько ханств, в то время как Московское государство, наоборот, усиливалось?

Дело в том, что поход Тохтамыша не был событием, сопоставимым с нашествием Батые. Последний вёл военные действия на Руси с 1237 по 1241 г., разорил огромную территорию (все русские земли, кроме Новгородской, Полоцкой и частично Смоленской), взял десятки городов. Тохтамыш находился в русских пределах всего около двух недель, кроме Москвы взял лишь три города (Серпухов, Переяславль-Залесский и Коломну), с Дмитрием Донским в бою не встречался. Почему же стремление к освобождению от зависимости, проявившееся в конфликте с Мамаем, затем обернулось почти столетним (то есть в течение жизни нескольких поколений) её продолжением?

Ситуация будет яснее, если уделить должное внимание обстоятельству, весьма важному для современников тех событий. После Батыева нашествия на Руси утвердилось титулование хана Орды “царём” [2]. Термин “цесарь/царь” в древнерусском языке являлся аналогом греческого “василевс” и латинского “император” — титулов правителей Византийской и Священной Римской империй. То есть он выступал в то время как высший титул земного правителя. Статус ордынского хана был, таким образом, выше статуса любого из русских князей. Соответственно, верховная власть хана над Русью обрела некое подобие легитимности: он царь, пусть и “беззаконный”, то есть нехристианский, но правитель высшего ранга, которому следует подчиняться (основания для этого находили в том числе и в Священном писании — в отношении ранних христиан к римским императорам-язычникам).

Между тем Мамай, противник Дмитрия Ивановича в 1374–1380 гг., не принадлежал к потомкам Чингисхана. В силу этого он не мог стать ханом (по-русски — царём). С конца 1350-х годов в Орде началась междоусобица — “замятня”, как её называли на Руси. Появилось несколько претендентов на престол. На этой волне и выдвинулся Мамай. Он имел титул эмира (бека), который современники воспринимали как соответствовавший русскому “князь”: русские источники, собственно, и именуют Мамай “князем ордынским” [3, стб. 70]. К середине 1360-х годов Мамай сумел взять под контроль западную часть Орды — к западу от Волги. В восточной же, заволжской, части продолжалась борьба,

и ханы здесь постоянно менялись. Мамай, будучи всего лишь эмиром, вынужден был править от лица марионеточных ханов, которых временами менял по своему усмотрению [4; 5, с. 695–698].

В силу “нецарского” статуса Мамайя противоборство с ним не разрушало ставшее традиционным представление о законности власти хана Орды — “царя” — над Русью. Ситуацию, при которой реальная власть в Орде находилась в руках не хана, а временщика, на Руси расценивали как нарушение нормы. “Царь ихъ не владѣяше ничимъ же, но всяко старѣшинство держаше Мамай”; “Некоему убо у них худу цѣсарююще, но все дѣюще у них князю Мамаю”, — писали о положении в Орде русские летописцы того времени [6, с. 416; 7, с. 376]. Ханов, от лица которых правил Мамай, могли пренебрежительно называть “Мамаевыми царями” [3, стб. 74]. Соответственно и борьба с Мамаем рассматривалась как выступление против незаконного правителя. Раз Мамай всего лишь “князь”, пусть первый среди ордынских князей (“беклярибек”), то он равен по статусу Дмитрию — первому среди русских князей, великому князю; следовательно, ему можно не подчиняться, с ним можно воевать.

Поэтому и победа на Куликовом поле для людей того времени была отражением конкретного нашествия, но не свержением иноземной власти вообще. Когда к власти пришёл природный хан (потомок Чингисхана) Тохтамыш (ранее утвердившийся в заволжской части Орды), добивший в конце 1380 г. бежавшего с Куликова поля Мамай, в Москве признали его верховенство [3, стб. 141]. Однако Дмитрий Донской не спешил возобновлять выплату дани, прекращённую в 1374 г.; ведь тогда никто не знал, что Тохтамыш утвердится у власти на полтора десятка лет, а не падёт через несколько месяцев, как некоторые из его предшественников. Следствием неуплаты дани (долг по которой рос с каждым годом) и явился поход Тохтамыша на Москву в 1382 г.

Отношение к конфликту с Тохтамышем было на Руси совершенно иным, чем к конфликту с Мамаем. Если последний щедро награждается русскими книжниками той эпохи уничижительными эпитетами — он и “поганый”, и “безбожный”, и “злочестивый” [3, стб. 134, 139] (его предшественников — законных “царей” — так не поносили), то по отношению к Тохтамышу ничего подобного не допускалось. Особенно примечательно, как современники мотивировали отъезд Дмитрия Ивановича из Москвы при приближении войск Тохтамыша. Наиболее раннее летописное повествование следующим образом объясняет поведение великого князя: “Князь же велики Дмитрей Ивановичь, то слышавъ, что сам царь идеть на него съ всею силою своею, не ста на бои противу его, не подня руки противу царя, но поеха въ свои градъ на Кострому” [3, стб. 143–144].

Это суждение летописца верно лишь в том смысле, что Дмитрий не стал принимать открытого сра-

жения, но не в том, что он вообще отказался от сопротивления: великий князь не поехал на поклон к хану, не пытался с ним договориться; его двоюродный брат, герой Куликовской битвы Владимир Андреевич Серпуховский разбил ордынский отряд у Волока; по словам того же летописца, Тохтамыш “вскорѣ отиде” из взятой им Москвы, опасаясь контрудара (“слышавъ, что князь велики на Костроме, а князь Володимеръ у Волока, поблюдашеся, чая на себе наезда”) [3, стб. 146]. Фактически московские князья “стали на бой” и “подняли руку” против “царя”, отказались они только от встречи с ним в генеральном сражении.

Отъезд Дмитрия Донского из Москвы был обычным тактическим приёмом правителей Средневековья: считалось (не только на Руси, во всей Европе), что они должны по возможности избегать сидения в осаде — наиболее пассивного вида военных действий. Москва была в то время (после постройки в 1367 г. белокаменного Кремля) неприступной крепостью, и взять её штурмом Тохтамышу не удалось. Хан достиг успеха обманом, выманив назначенного Дмитрием Ивановичем руководителя обороны города литовского князя Остея, внука Ольгерда, под предлогом переговоров, после чего он был убит, и ордынские войска ворвались в Москву [3, с. 143–146]. Но как бы то ни было, тактический план великого князя не удался: Москва была разорена, следовательно, кампания проиграна. В этой ситуации объяснение отказа от открытого боя нежеланием сражаться с “самим царём” (а поход Тохтамыша был первым после Батыева нашествия приходом на Русь во главе войска хана Орды) оказывалось лучшим в глазах общественного мнения оправданием для князя, более предпочтительным, чем попытка сослаться на очевидный факт недостатка сил после тяжёлых потерь, понесённых в Куликовской битве.

Очевидно, таким образом, что представление об ордынском хане как правителе более высокого ранга, чем великий князь владимирский, как о его законном сюзерене не уничтожило даже поражение фактического узурпатора власти в Орде Мамаю.

Победа Тохтамыша отнюдь не была полной и безоговорочной. Состояние войны с ним сохранялось ещё несколько месяцев, причём хан первым направил в Москву посла, сделав шаг к примирению. Оно состоялось весной 1383 г., когда в Орду прибыло посольство во главе со старшим сыном Дмитрия Ивановича Василием. Тохтамыш утвердил Дмитрия на великом княжении, более того, признал великое княжение наследственным достоянием московских князей [1, с. 103–107; 8, с. 110–113]. Между тем именно такое признание было главной политической целью Дмитрия Ивановича.

Во второй духовной грамоте (завещании) Дмитрия, составленной незадолго до его кончины, весной 1389 г., “великое княжение”, то есть территория, подвластная Дмитрию как великому князю

владимирскому (он же “великий князь всея Руси”, номинальный глава всех русских земель [9, с. 98–103]) рассматривается как наследственное достояние московской династии: “А се благословляю сына своего, князя Василья, своею отчиною, великимъ княженьемъ” [10, № 12, с. 34]. Предшественники Дмитрия — его отец Иван Иванович, дядя Семён Иванович и дед Иван Данилович Калита — передавали по наследству только московское княжение [10, № 1, 3, 4, с. 7, 9, 13–15, 17]. Выбор и утверждение великого князя владимирского со времён Батыя оставались прерогативой хана Орды.

После Ивана Калиты московские князья вроде бы фактически закрепили за собой великокняжеский престол: после смерти Ивана Даниловича в 1340 г. ярлык на великое княжение получил его сын Семён, после смерти Семёна (1353) его брат Иван. Но это вовсе не означало, что ханы не могли передать главное княжение Руси другим князьям. В 1360 г., вскоре после смерти Ивана Ивановича, тогдашний правитель Орды сделал великим князем не его сына Дмитрия (в ту пору девятилетнего), а суздальского князя. Вновь получить ярлык на великое княжение московскому князю удалось в 1362 г. [3, стб. 68, 72–74]. Позже Мамай дважды, в 1370 и 1375 гг., возводил в великокняжеский статус князя тверского Михаила Александровича [3, стб. 93, 95, 109–110]. После же получения ярлыка от Тохтамыша в 1383 г. великое княжение всея Руси стало наследственным достоянием московского княжеского дома. Хотя и сын Дмитрия Василий I, и внук Василий II, и правнук Иван III вступали на великое княжение по ханским ярлыкам, борьба за него теперь могла идти только между потомками Дмитрия Донского. Правители Орды в конце XIV и в XV в. уже были не в состоянии, как прежде, поддерживать баланс сил на Руси, возбуждать раздоры между князьями, манипулируя великим княжением.

Именно закрепление великого княжения за собой и своим потомством было главной политической целью Дмитрия Ивановича, после того как в 1362–1363 гг. он утвердился на великом княжении. Зимой 1364–1365 гг. суздальский князь Дмитрий Константинович, в 1360–1362 гг. занимавший великокняжеский стол, отказался в пользу московского князя от ярлыка на великое княжение, привезённого ему от одного из претендентов на власть в Орде, в обмен на поддержку в борьбе с братом Борисом за Нижний Новгород [3, стб. 77–78]. Последующая попытка Москвы подчинить себе тверского князя Михаила Александровича привела к столкновению с Великим княжеством Литовским, чей правитель Ольгерд был женат на сестре Михаила; литовские войска дважды — в 1368 и 1370 гг. — доходили до стен Москвы [3, стб. 88–90, 94–95].

В 1370 г. Мамай посадил на престол нового марионеточного хана — Мухаммед-Бюлека. Воспользовавшись этим, Михаил Тверской отправился в Орду

с жалобой на московского князя. Результатом стала выдача Михаилу ярлыка на великое княжение. Дмитрий Иванович отказался признать ярлык, летом 1371 г. сам поехал к Мамаю и ценой богатых даров добился возвращения ему статуса великого князя. Михаил вновь прибег к помощи Литвы и летом 1372 г. вместе с Ольгердом двинулся на Москву. Противоборствующие силы сошлись на Оке у Любутска, где было заключено мирное соглашение. Согласно его тексту, великий князь литовский признавал великое княжение “отчиной” Дмитрия Ивановича [3, стб. 93, 95–97, 103–104; 9, № 6, с. 22]. Полтора года спустя, зимой 1373–1374 гг., Михаил Тверской вынужден был отказаться от претензий на великое княжение [3, стб. 105].

Однако в 1374 г. “князю великому Дмитрию Московскому бышесть розмирие съ татары и съ Мамаемъ” [3, стб. 106]. Воспользовавшись этим, Михаил Тверской отправил в Орду своих послов, и в июле 1375 г. ему снова привезли от Мамаю ярлык на великое княжение. В ответ Дмитрий Иванович двинул на Тверь соединённое войско признававших его власть князей (в него вошли все князья Северо-Восточной Руси, некоторые князья из Смоленской и Черниговской земель, а также новгородцы). Михаил вынужден был капитулировать. Согласно заключённому тогда московско-тверскому договору он признал великое княжение “отчиной” Дмитрия, а себя – его “младшим братом”, то есть вассалом [3, стб. 109–112; 10, № 9, с. 25–26].

Вплоть до Куликовской битвы Дмитрий Иванович и Мамай находились в состоянии войны. Ярлык, выданный в 1375 г. Михаилу Тверскому, отменён не был, и если бы Мамай одержал в 1380 г. победу, он, скорее всего, осуществил бы своё решение пятилетней давности. Именно нежелание Мамаю отказаться от традиционной практики правителей Орды менять великих князей по своему усмотрению стало главной причиной конфликта.

Есть основания полагать, что “неханский” статус Мамаю сыграл против него в момент решающей схватки на Дону, а Дмитрий Иванович этот фактор умело использовал. На помощь Мамаю в сентябре 1380 г. шёл его союзник – великий князь литовский Ягайло. Если бы его войска соединились с ордынскими, соотношение сил серьёзно изменилось бы не в пользу Дмитрия. И великий князь (первым из русских князей за многие годы) двинулся на ордынские земли, перешёл Дон, спровоцировав Мамаю на атаку. Тот, казалось бы, мог не нападать, а подождать Ягайло. Но, будучи всего лишь временщиком, Мамай не имел права показать, что боится зависимого от Орды правителя (“улусника” по тогдашней терминологии), ведь верность подчинённых ему эмиров (других “князей ордынских”) была зыбка в условиях, когда в Орде не прекращалась междоусобная борьба. В результате Мамай не вынес дерзости противника, вступившего на подконтрольную

ему территорию, напал и потерпел сокрушительное поражение. Вскоре после этого, когда на Мамаю пришёл из-за Волги Тохтамыш, уцелевшие в Куликовской битве эмиры перешли на сторону законного хана [3, стб. 141].

Можно заключить, что не было ни “свержения ига” в 1380 г., ни его “восстановления” в 1382 г. Неподчинение узурпатору Мамаю ещё не привело к отрицанию верховенства ордынского хана – “царя”, власть которого продолжала признаваться. Попытка построить с законным ханом отношения без уплаты дани не удалась, но поражение от него не было катастрофой. Конфликт с Тохтамышем закончился обоюдовыгодным соглашением. С точки зрения мировосприятия того времени было восстановлено традиционное положение: в Орде у власти законный правитель, ему уплачивается “выход” – дань. А московский князь стал наследственным великим князем всея Руси.

В исторической памяти главным деянием великого князя Дмитрия Ивановича стала победа над Ордой Мамаю на Куликовом поле. И это закономерно. Триумф на поле брани всегда заметнее, чем долгосрочные усилия. Но победа на Дону окажется окружена тем ореолом, который привычен нам, много позднее самого этого события. Только с течением времени оно превратится в символ мужества и воинской славы, будет создан целый цикл произведений, посвящённых Куликовской битве, образы, с нею связанные, будут вдохновлять на защиту Отечества не одно столетие. Победа Дмитрия Донского станет представляться как главное событие в борьбе за освобождение от “ига”, что закономерно, поскольку события 1470-х годов, которые действительно привели к устранению зависимости от Орды, оказались не столь яркими.

Конкретное же политическое значение Куликовской победы понятно только в контексте всей деятельности Дмитрия Донского. Его главной целью было превратить великое княжение из объекта регулируемых Ордой притязаний правителей разных княжеств Северо-Восточной Руси в своё наследственное владение, объединить его с Московским княжеством в единое государственное образование. Он добился признания великого княжения своей “отчиной” со стороны Нижегородско-Суздальского княжества, Великого княжества Литовского, Тверского княжества. Оставалось главное признание – со стороны “сюзерена”, хана Орды. При Мамае этого достичь не удалось, началась московско-ордынская война, из которой Дмитрий вышел победителем. И только при Тохтамыше эта цель была достигнута, как ни парадоксально, после конфликта, закончившегося в целом военным поражением московского князя. В наследственном владении Дмитрия оказалась, помимо собственно Московского княжества, большая часть Северо-Восточной Руси. К великому княжению относились тогда города Владимир,

Кострома, Переяславль-Залесский, Юрьев, Дмитров, Галич Мерский, Углич, а также Ростов, Старица и Белоозеро, где сохранялись местные князья, но на правах “служебных князей” великого князя.

Таким образом, Куликовская победа укрепила могущество Москвы, что признал и законный правитель Орды. Если же говорить об отдалённых последствиях объединения Московского и великого Владимирского княжеств, то оно создало основу государственной территории будущего единого Русского государства — России.

Борьба за полную независимость от ордынского хана началась во второй половине XV в., когда возникла идея о переходе к московским князьям из павшей в 1453 г. Византийской империи “царского” достоинства [1, с. 147–179]. Свершения Дмитрия Донского заложили основу для этого. Противостояние мог возглавить не любой князь, а только великий князь всея Руси, и не временный (как было до Дмитрия), а наследственный. Чтобы освобождение стало возможным, необходимо было закрепить великое княжение за одной династической линией, что и осуществил Дмитрий Иванович. А битва на Куликовом поле — самая значительная и яркая веха на этом пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горский А.А. Москва и Орда. М.: Ломоносовъ, 2016.
Gorsky A.A. Moscow and the Horde. Moscow: Lomonosov, 2016.
2. Горский А.А. Представления о “царе” и “царстве” в средневековой Руси (до середины XVI века) // Царь и царство в русском общественном сознании. М.: ИРИ РАН, 1999. С. 17–37.
Gorsky A.A. Concepts of the “tsar” and “kingdom” in medieval Rus’ (until the middle of the 16th century) // Tsar and tsardom in Russian public consciousness. Moscow: Institute of Russian History, 1999. Pp. 17–37.
3. Полное собрание русских летописей. Т. 15. Вып. 1. Пг., 1922.
Complete collection of Russian chronicles. Vol. 15. Is. 1. Petrograd, 1922.
4. Григорьев А.П. Золотоордынские ханы 60–70-х годов XIV в.: хронология правлений // Историография и источниковедение стран Азии и Африки. Вып. 7. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. С. 9–54.
Grigoriev A.P. Golden Horde khans of the 60s–70s of the 14th century: chronology of reigns // Historiography and source studies of the countries of Asia and Africa. Is. 7. Leningrad: Publishing house of Leningrad State University, 1983. Pp. 9–54.
5. Золотая Орда в мировой истории. Казань: Ин-т истории им. Ш. Марджани АН РТ, 2016.
The Golden Horde in World History. Kazan: Institute of History named after Sh. Marjani, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2016.
6. Прицелков М.Д. Троицкая летопись. Реконструкция текста. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950.
Priselkov M.D. Trinity Chronicle. Text reconstruction. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1950.
7. Новгородская первая летопись старшего и младшего изводов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950.
Novgorod First Chronicle of the Senior and Junior Editions. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1950.
8. Горский А.А. От земель к великим княжениям: “примыслы” русских князей второй половины XIII – XV в. М.: Индрик, 2010.
Gorsky A.A. From lands to great principalities: “procu- rances” of Russian princes of the second half of the 13th – 15th centuries. Moscow: Indrik, 2010.
9. Горский А.А. Политическое развитие Средневековой Руси. М.: Наука, 2022.
Gorsky A.A. Political development of Medieval Rus’. Moscow: Nauka, 2022.
10. Духовные и договорные грамоты великих и удельных князей XIV–XVI вв. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950.
Testimonies and agreements of the great and appanage princes of the 14th–16th centuries. Moscow; Leningrad: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1950.

THE BATTLE OF KULIKOVO IN THE CONTEXT OF RELATIONS BETWEEN RUS' AND THE HORDE IN THE SECOND HALF OF THE 14th CENTURY

ON THE 645th ANNIVERSARY OF THE BATTLE ON KULIKOVO FIELD

A.A. Gorskii^{a,*}

^aInstitute of Russian History, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: gor-ks@yandex.ru*

What is the significance of the Battle of Kulikovo in the development of relations between the Russian lands and the Golden Horde? According to the author of the article, the victory of Grand Prince Dmitry Ivanovich over Mamai, who had usurped power in the Horde, was for the people of that time a repulse of a specific invasion, and not the overthrow of foreign power in general. The subsequent conflict – with the legitimate Khan Tokhtamysh – ended with the latter's recognition of the hereditary belonging of the Moscow princes to the Grand Principality of All Russia (Vladimir). It was the securing of the Grand Principality for himself and his descendants that was the main political goal of Dmitry Donskoy. The Battle of Kulikovo Field became the most significant and striking milestone on this path. The main consequence of the unification of the Moscow and Grand Principality of Vladimir was the creation of the foundation of a united Russian state – Russia.

Keywords: Battle of Kulikovo, Dmitry Donskoy, Golden Horde, Mamai, Tokhtamysh, Grand Principality.

БЫЛОЕ

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ Ш.Я. АМИРАНАШВИЛИ В ХОДЕ КАМПАНИИ ПО ПЕРЕДАЧЕ ГРУЗИНСКИХ ЦЕННОСТЕЙ ИЗ РОССИЙСКИХ СОБРАНИЙ В 1922–1923 гг.

© 2025 г. М.Д. Бухарин^{а,*}

^аИнститут всеобщей истории РАН, Москва, Россия

*E-mail: michabucha@gmail.com

Поступила в редакцию 08.02.2025 г.

После доработки 11.02.2025 г.

Принята к публикации 03.05.2025 г.

В 1922–1923 гг. по постановлению ВЦИК РСФСР российские музеи и библиотеки были вынуждены передать Грузии часть своих фондов грузинского происхождения. Сопротивление научной и музейной общественности не дало результата. В работе экспертных комиссий принимал участие начинающий историк искусства, будущий член-корреспондент АН СССР Ш.Я. Амиранашвили. Как показывают архивные документы из Государственного архива Российской Федерации (ГАРФ), Амиранашвили находился под очевидным политическим давлением. Помимо протоколов заседаний экспертных комиссий и копий актов передачи предметов искусства грузинской стороне, в ГАРФ сохранилось экспертное заключение Амиранашвили о грузинских памятниках Исторического музея, которому можно дать условное название “Соображения общего характера о грузинском изобразительном искусстве”. В нём дана развёрнутая характеристика средневекового грузинского искусства, в частности рельефов и скульптуры, выявлен его сложный многослойный характер. Это экспертное заключение можно считать первой научной работой Ш.Я. Амиранашвили.

Ключевые слова: история искусства, историко-культурные ценности, грузинское искусство, музеи, библиотеки, международное право, Ш.Я. Амиранашвили.

DOI: 10.31857/S0869587325080098, **EDN:** DTKHCC

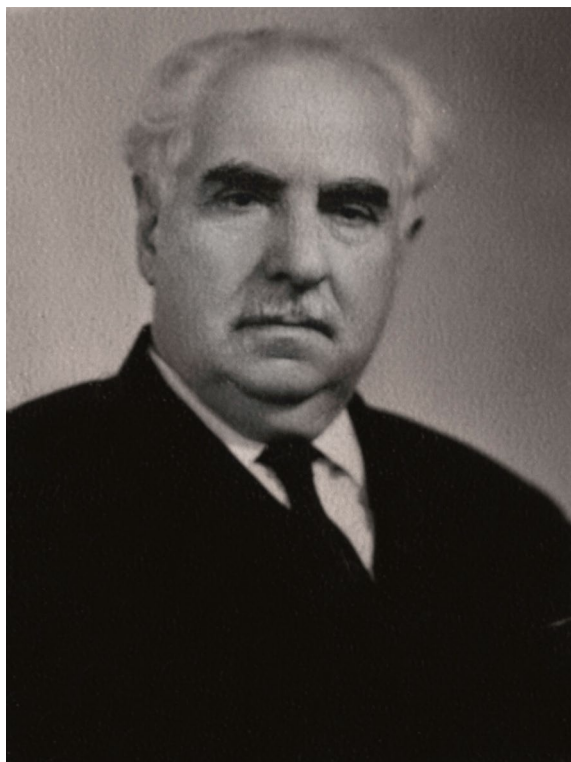
9 февраля 2025 г. исполнилось 50 лет со дня кончины Шалвы Ясоновича Амиранашвили (26 марта / 7 апреля 1899, Они, Рачинский уезд Кутаисской губернии – 9 февраля 1975, Тбилиси) – крупного советского грузинского специалиста по истории грузинского в частности и закавказского, ближневосточного (иранского, византийского) искусства в целом.



БУХАРИН Михаил Дмитриевич — академик РАН, главный научный сотрудник ИВИ РАН.

Ш.Я. Амиранашвили — выпускник философского факультета Тифлисского университета, ученик крупных историков, филологов, археологов И.А. Джавахишвили, Э.С. Такайшвили, Г.Н. Чубинашвили. С 1925 г. Амиранашвили преподавал в Тифлисском университете и академии художеств Грузии, с 1936 г. — в звании профессора. С 1939 г. и до конца жизни он работал директором Государственного музея искусств Грузии, в который пришёл в 1928 г. [1]. Его перу принадлежит ряд фундаментальных работ по истории грузинского искусства и культуры в целом [2–5].

Период обучения в университете пришёлся на время становления грузинского государства и, в частности, его включения в СССР в составе Закавказской Социалистической Федеративной Советской Республики (ЗСФСР). Грузия стремилась найти собственные исторические корни, “материализовать” их. С этой целью через республиканский Наркомпрос во ВЦИК РСФСР (председатель — А.С. Енукидзе) было направлено обращение с тре-



Ш.Я. Амиранашвили. Архив РАН. Ф. 411. Оп. 4а. Д. 295

бованием передать грузинской стороне памятники истории и культуры Грузии, хранившиеся в российских музеях и библиотеках. 20 июля 1922 г. ВЦИК РСФСР удовлетворил просьбу Грузии и издал соответствующий указ. С лета 1922 по лето 1923 г. шла кампания по поиску этих памятников в российских собраниях, согласованию их изъятия с научной и музейной общественностью, которая пыталась оказать сопротивление принятому решению.

Разрушение музейных коллекций в раннесоветский период не было новым словом советского государства в политике в области науки и культуры. Уже в ноябре 1917 г. была начата кампания по передаче Украине тех предметов, которые наиболее тесным образом были связаны с её историческим прошлым. По условиям Рижского договора, заключённого в марте 1921 г., Россия обязалась передать Польше ряд историко-культурных памятников польского происхождения. Однако эти передачи сопровождались целым рядом оговорок. Запрос же грузинской стороны должен был быть, согласно указу ВЦИК РСФСР, удовлетворён в полном объёме и без каких-либо ограничений. В этом таилась опасность раздела российских музейных собраний: польская сторона могла потребовать пересмотра ограничительных мер, кроме того, не только Грузия, но и другие государства, в том числе, имевшие такой же статус, что и Грузия, например, Армения, могли затребовать “свою” часть российских коллек-

ций. Кроме того, и на грузинские коллекции могли найтись другие претенденты. Так или иначе, раздел музейных и библиотечных собраний — в списках грузинской стороны фигурировало 12 учреждений науки и культуры, а также ряд архивов, вывезенных из Грузии в ходе Первой мировой войны, — мог выпустить джина из бутылки с непредсказуемыми последствиями.

Таким образом, начальный этап научной биографии Амиранашвили окрасился в драматические тона. Он кратко изложен в некрологе памяти учёного следующим образом: «В 1923 г. он получил годовую командировку в Москву и Ленинград для усовершенствования (в частности, в области древнерусского и византийского искусства), где пользовался консультациями Д.В. Айналова, Н.Я. Марра, Б.В. Фармаковского, Л.А. Мацулевича и др. К этому же году относится и его первая статья “Образ святого Георгия из Хоби” (Исторический вестник. Тбилиси, 1923)» [6, с. 276]. Скупые строки некролога скрывают полную накала драму, а для российской стороны — подлинную трагедию, которая разыгралась в 1922–1923 гг., когда проходила кампания по изъятию историко-культурных памятников грузинского (или предположительно грузинского) происхождения для последующей их передачи грузинской стороне.

Кампания 1920-х годов была не единственной, в которой довелось участвовать Амиранашвили. После окончания Второй мировой войны он был командирован в Париж с целью возвращения памятников истории и культуры Грузии, вывезенных меньшевистским правительством в 1921 г. Однако эта командировка не имела ничего общего по накалу страстей с тем, что пришлось пережить участникам событий 1922–1923 гг. Показательно, что в некоторых публикациях по истории грузинского искусства упоминается миссия 1945 г. по реэвакуации грузинских ценностей, однако сведения о кампании 1922–1923 гг. не приводятся [7, с. 4].

Десятки, если не сотни архивных документов ещё хранят множество тайн, связанных с этой кампанией. Одним из наиболее важных собраний в этой связи является Государственный архив Российской Федерации (далее — ГАРФ), в котором собраны документы, иллюстрирующие в том числе перипетии начального этапа научной биографии Амиранашвили. Общий ход кампании в главных чертах представлен в единственной пока статье, специально посвящённой этому вопросу [8]. Несомненно, обращение к истории деятельности Амиранашвили-эксперта в ходе кампании 1922–1923 гг. обогатит не только понимание институциональной истории советской науки и культуры, но и благодаря одному неожиданному архивному открытию прольёт свет на биографию Амиранашвили-учёного.

В Государственном архиве Российской Федерации сохранилось несколько документов, которые иллю-

стрируют подробности деятельности Амиранашвили в различных комиссиях по перемещению ценностей грузинского происхождения из российских собраний. Наиболее ранний документ датируется 5 февраля 1923 г., когда “для работ по изъятию... памятников” в Оружейную палату и был командирован Амиранашвили (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 74). Именно на этот день была назначена передача памятников (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 75). Вероятно, она была начата 6 февраля и завершена 9 февраля 1923 г., о чём свидетельствует “копия акта о передаче грузинских ценностей представителям Грузинской республики и копия заключения ювелира-эксперта” за подписью заведующего музеем Д.Д. Иванова (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 80–82а).

Ш.Я. Амиранашвили подключился к работе экспертов в Историческом музее 19 февраля 1923 г. (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 85). Его подпись стоит под “Протоколом Совещания по вопросу о передаче некоторых предметов грузинского происхождения из коллекции Российского исторического музея Тифлисскому музею на основании постановления ВЦИК от 29 августа 1922 г. за № 57 и 9 октября 1922 г. за № 67 от 15 марта 1923 г.” В совещании принимали участие председатель учёного совета музея Н.М. Щёкотов и уполномоченный музейного отдела наркомпроса С.П. Григоров (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 82б–82б об.). На совещании рассматривали происхождение и возможность передачи грузинской стороне пяти памятников:

- барельефа алтарной преграды Сафарского монастыря отдела византийских древностей. Решено считать возможным передачу грузинской стороне после изготовления гипсового слепка; при этом Амиранашвили, явно ограниченный во времени, затребовал изготовить слепок в течение месяца;
- лицевой псалтири из отдела рукописей (№ 2886). Решено считать возможным передачу грузинской стороне только на основе обмена на аналогичную рукопись из Грузии. И на этот раз Амиранашвили попросил не задерживать передачу рукописи “в зависимости от предоставления Грузией соответствующего сравнительного материала”;
- палицы из отдела религиозного быта (№ 15979). Решено считать передачу грузинской стороне возможной;
- памятников шитья серебром и золотом из отдела византийских древностей (№ 116 и 118). Оба памятника решено оставить в музее как явно негрузинского происхождения (№ 116) и как единственный экземпляр в музее (№ 118);
- деревянного ковша в серебряной оправе. Решено считать передачу грузинской стороне возможной.

Комиссия по выдаче ценностей грузинской стороне заседала в Историческом музее и 18 апреля 1923 г. [9, с. 377], и 7 мая [9, с. 380]. 25 июля 1923 г. Главнаука потребовала выдать восемь предметов из

собрания музея (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 87), но 26 июля вещи из Исторического музея всё ещё не были выданы в полном объёме. А.В. Орешников — член комиссии — записал в дневнике: “В Музее был грузин, требовал вещи грузинского происхождения, я отказал, мотивируя свой отказ каникулами до 15 августа” [9, с. 391]. Вероятно, под “грузином” подразумевается именно Амиранашвили.

В конце мая — начале июня 1923 г. расстаться с частью своего рукописного фонда в пользу Грузии была вынуждена Петроградская Публичная библиотека. Об этом свидетельствует “Опись рукописей Публичной библиотеки, переданных Грузии, составленная экспертами А.Н. Генко и Ш.Я. Амиранашвили в заседаниях 24, 25, 26, 30, 31 мая и 1 июня” [1, с. 4].

10 июля 1923 г. в Губоно г. Ярославля заведующему губернскими музеями поступил запрос с требованием выдать две пушки эксперту при Академпредставительстве Грузинской ССР в РСФСР Ш.Я. Амиранашвили (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 86; от документа сохранилась только начальная часть). Речь идёт о пушках с грузинскими надписями Еристава Ростом 1756 г., упоминаемых в публикации А.А. Цагарели “Грузинские надписи, найденные в России”. Относительно происхождения этих пушек Цагарели писал: “История происхождения этих пушек и появления их в Спб. Адмиралтействе неизвестна. Быть может, они привезены сюда из Кутаиса после присоединения Имеретии к России в 1810 году; в Кутаис же могли они попасть, как и трофеи победы, после поражения, нанесённого имеретинским царём Соломоном I сильному, полунезависимому феодалу Ростому Эриставу Рачинскому, объявившему царю войну в 1767–1768 гг.” [10, с. 230]. Между тем пушек в собрании Артиллерийского музея не оказалось. Они были обнаружены в упакованном виде в Ярославле, куда в составе коллекции Петроградского исторического артиллерийского музея были эвакуированы во время Первой мировой войны.

Этими документами свидетельства из ГАРФ с упоминанием Ш.Я. Амиранашвили не исчерпываются. Очевидно, что в своей деятельности он руководствовался должностными инструкциями и указом ВЦИК от 20 июля 1922 г., согласно которому “все регалии древней Грузии, вывезенные в Россию и принадлежащие Грузии по удостоверениям в Государственном архиве и Наркомпросе и хранящиеся в Главархиве, Оружейной палате и других музейных хранилищах, возвратить Грузинской Советской Социалистической Республике” (ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 3. Д. 282. Л. 1).

Значительный интерес в данном контексте представляет докладная записка Амиранашвили, составленная им во время работы в Историческом музее над определением происхождения памятников, претензии на которые выразила грузинская сторо-

на. Данный текст фактически представляет собой первую научную работу будущего члена-корреспондента АН СССР, в которой он даёт ёмкую характеристику средневекового грузинского искусства, в частности, его происхождения, связей с другими древними и средневековыми традициями.

Из текста докладной записки видно, что интересы Амиранашвили-учёного превалировали над интересами Амиранашвили как должностного лица. Он указывает на глубокие корни грузинского искусства, в частности на то, что ряд важнейших сюжетов был заимствован из искусства сирийского, иранского, греческого. Соответственно, нет причин считать некоторые памятники, фигурировавшие в списках грузинской делегации, которая работала в Историческом музее, собственно грузинскими с точки зрения истории искусства. Тем не менее как эксперт, имевший вполне определённые обязанности по изъятию и доставке в Грузию предметов изобразительного искусства, Амиранашвили настаивал на их передаче после изготовления гипсовых копий.

Точная датировка докладной записки — непостоянная задача. Очевидно, что текст должен быть датирован временем работы Особой комиссии по обсуждению вопроса о передаче Грузии её национальных собраний и коллекций. Решение о создании комиссии было принято летом 1922 г., первый известный протокол её заседания датирован 24 июня 1922 г. Фактически в поле зрения комиссии находились лишь рукописи. Передача предметов изобразительного искусства детально не обсуждалась. Поэтому ясно, почему среди приглашённых экспертов фамилия Амиранашвили не фигурировала.

Согласно п. II протокола, для “просмотра” российских коллекций нужно было сформировать ещё одну комиссию “в составе одного представителя от Союзного Совета Закавказья, одного — от Совнаркома Грузии и одного — от Наркомпроса РСФСР” (публикацию протокола см.: [8, с. 364]). Постановление о возможности возврата Грузии рукописей грузинского происхождения было принято 10 октября 1922 г., однако 3 ноября 1922 г. этот вопрос ещё обсуждался в Академии наук [8, с. 365]. Тогда же, 10 октября 1922 г., Объединённая комиссия при Наркомпросе “для точного и всестороннего рассмотрения вопросов, сюда относящихся” и пригласила двух представителей от учёных Грузии и двух представителей Академии наук [8, с. 369]. Возможно, именно с принятием этого постановления Амиранашвили и был приглашён в Петроград. Комиссия должна была начать работу 25 ноября 1922 г., в её ведение попали не только рукописи, но и “все предметы уникального характера, вывезенные из Грузии с 1801 г.” Самый ранний документ, в котором упоминается деятельность Амиранашвили в статусе эксперта с грузинской стороны, как указывалось выше, датирован 5 февраля 1923 г.

Судя по тексту докладной записки, передача памятников грузинского искусства из Исторического музея на момент её составления ещё не началась. На это указывает ссылка в тексте записки на те предметы, которые были вывезены графиней П.С. Уваровой и которые могут быть оставлены в музее “в качестве сравнительного материала”. Именно об этом идёт речь в протоколе совещания от 15 марта 1923 г. Вероятно, незадолго до этого дня и была составлена записка Амиранашвили.

Таким образом, *terminus post quem* докладной записки Амиранашвили следует считать середину марта 1923 г. Более точная дата едва ли может быть определена без обнаружения дополнительных документальных свидетельств работы комиссии по осмотру и отбору для передачи памятников изобразительного искусства грузинского происхождения из российских музейных собраний.

Текст докладной записки набран на печатной машинке. Машинопись крайне неразборчива. Местами текст практически не читается. Листы 88 и 89 занимают по две страницы. Орфографические ошибки исправлены. Судя по тому, что ряд грузинских топонимов напечатан с ошибками, текст перепечатывал секретарь, не знакомый с грузинской топонимикой. Подчёркивания в тексте выделены курсивом. Примечания к тексту даны *postscriptum*.

[не ранее 15 марта 1923 г.]

[88] В Полномочную Комиссию по обсуждению вопроса о передаче С.С.Р. Грузии её древних художественно-исторических памятников, находящихся в различных хранилищах Р.С.Ф.С.Р.

Эксперта при Академическом
Представителе С.С.Р. Грузии в Р.С.Ф.С.Р.
Ш.Я. Амиранашвили

Докладная записка

<Соображения общего характера о грузинском изобразительном искусстве>

Считаю необходимым изложить свои соображения относительно некоторых памятников грузинского происхождения, находящихся в Р<оссийском> И<сторическом> М<узее> в Москве.

Памятники, о которых ниже будут высказаны мною свои соображения, вывезены граф<иней> П. Уваровой из Абхазии и Аджарии в 1893 г. и переданы ею на хранение в Р<оссийский> И<сторический> М<узей>. Они распадаются на две основные группы, а именно:

а) к первой группе относятся фрагменты алтарной преграды из Цебельды (Абхазия) и пластинка с рельефными изображениями в два регистра на церкви села Агара (Аджария);

б) ко второй — бронзовый подсвечник и ставка для свечей (паникадило) из церкви села Полтавского (Абхазия).

Прежде чем приступить к анализу вышеприведенных двух основных групп памятников, считаю необходимым для понимания обеих групп памятников высказать соображения общего характера о грузинском изобразительном искусстве.

Христианская Грузия никогда не знала самостоятельной скульптуры, независимой от архитектурных сооружений; все до нас дошедшие памятники скульптуры представляют собой рельефы (нет ни одной статуи), которые служили для украшения фасадов храмов, алтарных преград и проч. При этом особенностью грузинского искусства является то, что оно широко развило скульптуру в украшении алтарных преград. Целый ряд первоклассных по своему художественно-историческому значению памятников этого рода, дошедших до нас, свидетельствует о том, что грузинское искусство выработало два основных типа, которые сильно друг от друга различаются, оно разработало определенные циклы священо-исторических событий, и разным образом житийные циклы излюбленных святых, и, наконец, свои приемы в области техники изготовления и обработки форм. К одному типу памятников этого рода относятся алтарные преграды без фигурных изображений, богато украшенные декоративной резьбой (алтарная преграда села Агара из Абхазии и т.п.).

<К> другому типу относятся алтарные преграды с фигурными изображениями, очень часто представляющими отдельные циклы священо-исторических событий и житийных сцен. Наиболее интересны памятники второго рода, представленные такими первоклассными памятниками, как алтарные преграды из Сафары, Ховле, Зедазен<и>, Шимгвие, Самцевриси, Мцхета¹ и др.

а) 1. Древнейшими из памятников этого рода являются два фрагмента алтарной преграды из Цебельды, которые датируются VII веком. Памятник этот издан два раза — граф<иней> Уваровой М<атериалы по археологии Кавказа>² т. IV и проф. Д. Айналовым А.И.З. 7—8, 1895 г.³

Для понимания этого памятника нужно помнить, что начала христианской культуры вошли в Грузию по древнему пути, культуры с юга, из Сирии и по мере своего проникновения в грузинскую среду впитали в себя жизненные элементы древнейшей “яфетической основы”. Христианское искусство, в особенности церковная архитектура и отчасти скульптура, обнажают при внимательном изучении яфетические основы. Грузия, восприняв элементы чисто восточного происхождения, не прошедшие даже через византийскую среду, почти с самого начала определенно выразила свою духовную самостоятельность и еще в V веке создала свою письменность и собственное искусство. Древнейшие памятники грузинского искусства, носят ясные

следы влияния сирийского и сасанидского отчасти искусства (Болнисский Сион, рельефы Джварис⁴, Саждари⁵ и др.).

Греческое христианство, шедшее за своими торговыми колониями на восточном берегу Черного моря, укрепилось на нем только в пределах их непосредственного влияния, но оно не могло пустить в крае глубоких корней, т.к. оно одновременно с новой религией навязывало населению совершенно чуждую греческую речь, в качестве церковного языка и письменности.

Влияние греческого образования и искусства на Грузию было большое, [89] но содействовало лишь углублению воспринятых впервые начал, раз данного направления, в период, когда грузинское искусство имело свои собственные традиции и особенностями веками выработанные, и оно ясно намечается лишь с конца IX века.

В виду того, что подробное описание и анализ фрагментов преграды из Цебельды уже издан довольно подробно, позволяю себе отметить то, что осталось неотмеченным обоими издателями, которое имеет большое значение. Дело в том, что оба фрагмента дают ряд иконографических и стилистических особенностей, чисто восточного происхождения, не прошедших еще через византийскую среду. На композиции жертвоприношения Авраамом Исаака, баран изображен висящим рогами на ветвях дерева: объяснение последнего находим в грузинской редакции перевода св. Писания, в которой сохранилась древнейшая версия этого рассказа, восходящая к сирийским подлинникам. Аналогичное изображение этого сюжета мы находим в других памятниках этой эпохи (напр., рельефы дворцовой церкви Ани VII века и т.д.) чисто восточного происхождения в группе грузино-армянских памятников сиропильского круга. Сцена чуда св. Евстафия, изображенного в виде сасанидского всадника в соответствующем одеянии, имеет ряд аналогий в памятниках грузинского искусства и ближайшую аналогию дает рельеф на Натлисмцемели, датируемый VII веком, груз<инской> надписью.

Пропорции фигур, обработка деталей ликов, рук и ног, трактовка складок одеяний, плоскостность рельефа, отсутствие моделировки *форм* и ряд других характерных стилистических и технических особенностей указывают на то, что памятник этот местного происхождения и отражает типичные черты эпохи зарождения самобытного искусства с характерными для этого периода влияниями. В этом отношении данный памятник для истории грузинского искусства имеет громадное значение, и он ничем не может быть замененным, ибо от этой эпохи других алтарных преград с рельефными изображениями мы не имеем.

II. Из второго же храма граф<иней> Уваровой вывезены две плиты, одна сильно фрагментированная изображает всадника (св. воина?), а другая двух

святителей. Оба рельефа придерживаются византийских норм в общих своих формах, хотя их нельзя считать произведениями собственно византийского искусства. Датируются они XI веком, т.е. эпохой наибольшего влияния византийского искусства на грузинское, выраженное в памятниках Западной Грузии. В этом отношении значение этих фрагментов для истории грузинского и отчасти византийского искусства большое, ибо они ясно выражают отпечаток своей эпохи.

III. Из этого же храма граф<иней> Уваровой вывезены две плиты с декоративной резьбой типичного грузинского пошиба. Мотивы орнаментальной резьбы, представленные на этих памятниках, появляются в памятниках грузинского искусства с конца X века, XI–XIII <вв.> – период их наибольшего и почти повсеместного распространения, XIV век дает только повторения этих мотивов, но стиль меняет свой основной характер. Плиты эти, судя по стилю и технике, относятся ко второй половине XIII века. Оба памятника имеют ряд ближайших аналогий и могут быть оставленными в Р<оссийском> И<сторическом> М<узее> в качестве сравнительного материала.

IV. Граф<иня> Уварова из церкви села Агара (Аджария) вывезла пластинку из зеленого песчаника (из этого материала изготовлены все алтарные преграды с рельефными изображениями, исключая лишь преграду из Цебельды), с рельефными изображениями в два регистра.

По стилю и технике изготовления памятник относится к грекофильскому кругу памятников грузинского искусства и имеет близкие аналогии по стилю с византийскими памятниками резьбы по слоновой кости X–XI в.

На лицевой стороне дана надпись грузинская военным шрифтом (“мхедрули”), начала XV века, судя по палеографическим особенностям. Надпись гласит: <Илл. 1> – Шемокмедский (митрополит) Гавриил.

Памятник этот, как типичный памятник грузинского искусства грекофильского круга, имеющий близкое родство с памятниками византийского искусства, ни в чем не уступает в артистичности исполнения лучшим памятникам византийского искусства в области скульптурной резьбы и, тем самым, приобретает громадное [90] значение для истории грузинского искусства.

в) 1. Из села Полтавского (Абхазия) граф<иня> Уварова вывезла подсвечник и ставку для свечей. Оба памятника имеют ряд особенностей, типичных для византийского искусства. Оба этих памятника стоят обособленно, и ближайших аналогий в грузинском искусстве лично я не знаю.

Даже в том случае, если будет, несомненно, установлено негрузинское происхождение обоих памятников, значение этих памятников не умаляется, т.к. они вошли в церковный обиход, проникли в мест-

ную культурную среду и тем самым свидетельствуют тесное культурное общение Грузии с Византией.

Эксперт

/подпись/

ГАРФ. Ф. 2307. Оп. 15. Д. 98. Л. 88–90. Машинопись.

Примечания

1. Слово дважды исправлено. Первоначальный вариант не читается.

2. Имеется в виду следующая публикация [11, с. 21–23. Табл. VI–VII].

3. Имеется в виду следующая публикация [12, с. 233–243 (= 13)].

Под “таблицей”, упоминаемой в заглавии статьи, имеется в виду фотография обоих фрагментов ограды, предвещающая отдельную публикацию. В “Археологических известиях и заметках” “таблица” вынесена в самый конец выпуска.

4. Рельефы из Джвари в Мцхете и из храма Болнисского Сиона в Музее искусств им. Ш. Амиранашвили представлены гипсовыми муляжами (см. [7, Pl. VII, X]).

5. Слово дважды исправлено, чтение предположительное.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счёт гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-537).

ЛИТЕРАТУРА

1. Амиранашвили Ш. საქართველოდან სხვადასხვა დროს გატანილი სამუზეუმო განმეულობა და მისი დაბრუნება. თბ.: თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა. Разновременные вывезенные из Грузии и возвращённые музейные ценности. Тбилиси, 1968.
2. Амиранашвили Ш. Museum valuables taken out of Georgia at different times and returned. Tbilisi, 1968.
3. Амиранашвили Ш.Я. Убиси: Материалы по истории грузинской стенной живописи. Тифлис: Гл. Упр. Нар. Учр. Наркомпроса ССР Грузии, 1929. (Памятники Древне-Грузинского Искусства; 1).
4. Амиранашвили Ш. Ya. Ubisi: Materials on the history of Georgian wall painting. Tiflis: Main Administration of the People's Commissariat of Education of the SSR of Georgia, 1929. (Monuments of Ancient Georgian Art; 1).
5. Амиранашвили Ш.Я. История грузинского искусства. Т. 1. М., Л.: Искусство, Тип. им. Ивана Фёдорова, 1950.

- Amiranashvili Sh. Ya.* History of Georgian Art. Vol. 1. M., L.: Art, Ivan Fedorov Publishing House, 1950.
4. *Амиранашвили Ш.Я.* История грузинской монументальной живописи. Т. 1: Грузинская монументальная живопись эпохи VII–IX вв. и эпохи расцвета феодальной монархии, X–XII вв. Тбилиси: Госиздат Груз. ССР, 1957.
Amiranashvili Sh. Ya. History of Georgian monumental painting. V. 1: Georgian monumental painting of the 7th–9th centuries and the heyday of the feudal monarchy, 10th–12th centuries. Tbilisi: State Publishing House of the Georgian SSR, 1957.
 5. *Амиранашвили Ш.Я.* Вклад Грузии в сокровищницу художественной культуры (Лекция I и II). Тбилиси, 1953.
Amiranashvili Sh. Ya. Georgia's Contribution to the Treasury of Artistic Culture (Lectures I and II). Tbilisi, 1953.
 6. *Банк А.В.* Шалва Ясонович Амиранашвили (1899–1975) // Византийский временник. 1977. Т. 38. С. 276–278.
Bank A.V. Shalva Yasonovich Amiranashvili (1899–1975) // Byzantine Time. 1977, vol. 38, pp. 276–278.
 7. *Sanikidzé T.* Le Musée des Beaux-Arts de Géorgie. Tbilisi, Léningrad: Édition d'art Aurora, 1985.
 8. *Ананьев В.Г., Бухарин М.Д.* Российская академия наук и проблема перемещения памятников историко-культурного наследия грузинского происхождения в 1920-е гг. // Византийский временник. 2020. Т. 104. С. 360–379.
Ananyev V.G., Bukharin M.D. The Russian Academy of Sciences and the Problem of Relocation of Historical and Cultural Heritage Monuments of Georgian Origin in the 1920s // Byzantine Timeline. 2020, vol. 104, pp. 360–379.
 9. *Орешников А.В.* Дневник. 1915–1933: в 2 кн. / Сост. П.Г. Гайдуков, Н.Л. Зубова, М.В. Катагощина и др.; отв. ред. П.Г. Гайдуков. Кн. 1: 1915–1924. М.: Наука, 2010.
Oreshnikov A.V. Diary. 1915–1933: in 2 books / Comp. P.G. Gaidukov, N.L. Zubova, M.V. Katagoshchina, and others; ed. P.G. Gaidukov. Book 1: 1915–1924. Moscow: Nauka, 2010.
 10. *Цагарели А.* Грузинские надписи, найденные в России // Записки Восточного отделения Русского Археологического общества. 1887. Т. II. С. 227–232.
Tsagareli A. Georgian inscriptions found in Russia // Notes of the Eastern Branch of the Russian Archaeological Society. 1887, vol. II, pp. 227–232.
 11. Материалы по археологии Кавказа, собранные экспедициями Московского археологического общества / Под ред. и с предисл. гр. Уваровой. Вып. 4. Христианские памятники графини Уваровой. М.: Тип. А.И. Мамонтова и К°, 1894.
Materials on the archeology of the Caucasus, collected by expeditions of the Moscow Archaeological Society / Ed. and with a preface by Countess Uvarova. Issue 4. Christian monuments of Countess Uvarova. Moscow: Type. A.I. Mamontov and Co., 1894.
 12. *Айналов Д.В.* Некоторые христианские памятники Кавказа (с таблицей) // Археологические известия и заметки. 1895. № 7–8. С. 233–243.
Ainalov D.V. Some Christian monuments of the Caucasus (with a table) // Archaeological news and notes. 1895, no. 7–8, pp. 233–243.
 13. *Айналов Д.* Некоторые христианские памятники Кавказа (с таблицей). М.: Т-во тип. А.И. Мамонтова, 1895.
Ainalov D. Some Christian monuments of the Caucasus (with a table). Moscow: A.I. Mamontov Printing House, 1895.

ACTIVITIES OF SH.YA. AMIRANASHVILI DURING THE CAMPAIGN TO TRANSFER GEORGIAN VALUES FROM RUSSIAN COLLECTIONS IN 1922–1923

M.D. Bukharin^{a,*}

^a*Institute of General History of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: michabucha@gmail.com*

In 1922–1923, by decree of the All-Russian Central Executive Committee of the RSFSR, Russian museums and libraries were forced to transfer part of their collections of Georgian origin to Georgia. Resistance from the scientific and museum community did not produce results. A budding art historian, future Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences Sh.Ya. Amiranashvili took part in the work of the expert commissions. As archival documents from the State Archives of the Russian Federation (GARF) show, Amiranashvili was under obvious political pressure. In addition to the minutes of the meetings of the expert commissions and copies of the acts of transfer of art objects to the Georgian side, the GARF has preserved Amiranashvili's expert opinion on the Georgian monuments of the Historical Museum, which can be given the provisional title "General Considerations on Georgian Fine Art". It provides an expanded description of medieval Georgian art, in particular reliefs and sculpture, and reveals the complex multi-layered nature of medieval Georgian art. This expert opinion can be considered the first scientific work of Sh.Ya. Amiranashvili.

Keywords: history of art, historical and cultural values, Georgian art, museums, libraries, international law, Sh.Ya. Amiranashvili.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОТДЕЛ

НАГРАДЫ И ПРЕМИИ

ПРЕМИЯ ИМЕНИ Л.И. МАНДЕЛЬШТАМА 2024 ГОДА –
Ю.И. ТРОИЦКОЙ И Д.А. СЕРГЕЕВУ



Президиум РАН присудил премию им. Л.И. Мандельштама 2024 года доктору физико-математических наук Юлии Игоревне Троицкой и кандидату физико-математических наук Даниилу Александровичу Сергееву (Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН) за цикл работ “Пограничные слои атмосферы и океана при экстремальных условиях: физические механизмы взаимодействия и методы диагностики”.

Проведённые авторами исследования доказали высокую эффективность применения радиофизических (колебательно-волновых) методов и подходов при решении важных проблем геофизики. Обнаружены и изучены ранее неизвестные физические механизмы, отвечающие за энергообмен между атмосферой и океаном при экстремально высоких скоростях ветра и обусловленные мелкомасштабными процессами в их пограничных слоях в условиях шторма (брызги и пена). Установлен основной механизм генерации капель при экстремальных скоростях ветра — дробление по типу “парашют” как результат развития сильно нелинейных мелкомасштабных волновых возмущений на границе раздела

жидкости с высокоскоростным газовым потоком. Описаны эффекты, связанные с присутствием пены на поверхности океана. На основе квазилинейного подхода построена модель, отражающая вклад ветровых волн в присутствии брызг и пены в процессы обмена между океаном и атмосферой, которая позволяет объяснить их аномальные свойства при экстремальном ветре. Внедрение этой модели в численные модели циркуляции атмосферы позволяет описать эффект быстрой интенсификации ураганов. Рассмотрено влияние мелкомасштабных процессов на особенности рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона морской поверхностью при сильных ветрах. Получено прямое экспериментальное доказательство того, что рост кросс-поляризационного обратного рассеяния с увеличением скорости ветра при шторме обеспечивается рассеянием на пенных гребнях обрушающихся волн, доля площади которых монотонно растёт вместе со скоростью ветра. Эти закономерности составляют физическую основу алгоритма восстановления скорости ураганного ветра по дистанционным, в том числе спутниковым, радиолокационным измерениям.