

А. В. Павлов

ВИРТУАЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ В ПРЕПОДАВАНИИ ГИСТОЛОГИИ – НОВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ ЭПОХИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра гистологии, цитологии и эмбриологии (зав. — проф. А. В. Павлов), ФГБОУ ВО «Ярославский государственный медицинский университет» Минздрава РФ

Введение. Начиная с XIX в. световая микроскопия является классическим инструментом изучения структуры клеток, тканей и органов, используемым в преподавании гистологии и гистопатологии. С 80-х годов XX в. возможности визуализации микроскопических объектов с помощью световой микроскопии существенно расширились за счет разработки новых технологических решений (видеомикроскопия, использование оцифрованных изображений участков гистологических препаратов) [6, 16, 17]. Закономерным развитием этой тенденции явилось появление технических возможностей генерировать виртуальные копии всего гистологического препарата, при работе с которыми исследователь может выбрать произвольное увеличение в любой его области [28, 55, 56]. Данная методика цифровой визуализации получила в литературе название технологии WSI (Whole Slide Imaging), а проводимая на компьютере навигация по полученным подобным образом оцифрованным образцам обозначается как виртуальная микроскопия; очень часто оба этих термина используются как синонимы [2, 29, 32, 47].

За истекшие два десятилетия WSI-технологии успешно развивались и закономерно заняли достойное место в патологической морфологии, телемедицинской диагностике и образовании [56], однако, в высшей медицинской школе России они применяются пока в достаточно ограниченных масштабах [2, 5, 9, 10]. Задачей настоящей работы явилось обобщение накопленного опыта использования виртуальной микроскопии в преподавании нормальной гистологии с целью объективной оценки актуальности и перспектив внедрения данной технологии в систему отечественного высшего медицинского образования.

Технологические основы виртуальной микроскопии

Работа с изображениями для виртуальной микроскопии включает 4 последовательных этапа: получение (сканирование) цифрового изображения, хранение, редактирование, просмотр файлов и их передача для совместного использования [43].

Наиболее простой вариант создания виртуальных слайдов заключается в последовательном фотографировании полей зрения препарата в ручном или полуавтоматическом режиме с использованием одного или нескольких объективов микроскопа, с помощью специализированного программного обеспечения фрагменты изображений участков препарата «сшиваются» в единый графический файл [35, 49].

Гораздо более перспективным способом создания качественных оцифрованных копий микроскопических объектов, инициированным ускоренным развитием телемедицинских технологий, явилось использование нового поколения роботизированных устройств — сканеров гистологических препаратов [32, 55]. Технологические подходы, лежащие в основе их работы, детально рассмотрены в обзоре М. D. Zarella и соавт. [56]. Система сканирует весь слайд целиком при требуемом разрешении, отдельные ее компоненты (микроскоп, моторизованный предметный столик, персональный компьютер, программное обеспечение) оптимально скоординированы между собой, режимы работы в интегрированном фокусе обеспечивают четкость изображения, получаемые на разных увеличениях отдельные снимки автоматически сшиваются в один большой файл («виртуальный слайд»). Для обеспечения необходимого качества изображения оно должно быть получено при достаточно высо-

Сведения об авторе:

Павлов Алексей Владимирович (e-mail: pavlov@ysmu.ru), кафедра гистологии, цитологии и эмбриологии, Ярославский государственный медицинский университет, 150000, г. Ярославль, ул. Революционная, 5

ком разрешении и с адекватной глубиной цвета. Например, типичное целое слайд-изображение, отсканированное с увеличением 40, имеет разрешение около 0,25 мкм/пиксель и глубину цвета 24 бита. На качество изображения большое влияние оказывает способ оптической фокусировки: возможны сканирование в одной виртуальной фокальной плоскости или наложение нескольких плоскостей с различными настройками фокуса (z-stacking).

Поскольку виртуальные слайды получаются достаточно объемными (1–50 Гб), производители сканеров используют разные режимы сжатия изображений, позволяющие уменьшать объем исходного файла при сохранении надлежащего качества изображения в 7–15 раз [36]; дополнительным методом уменьшения размера WSI-файла является полное удаление пустых областей отсканированного объекта. Каждый виртуальный препарат содержит графическую информацию в нескольких разрешениях («пирамида изображений»): образец, полученный при увеличении 40, включает тоже изображение с пониженной дискретизацией при меньших увеличениях (20 и 10), а также миниатюрное изображение. Во время виртуальной микроскопии на монитор загружается не весь файл, а только видимый его фрагмент на соответствующем увеличении, при перемещении и изменении масштаба изображения на экран выводятся новые участки цифровой копии гистологического препарата. Подобный алгоритм существенно повышает скорость передачи/обработки информационных потоков и вывода на монитор данных по сравнению с загрузкой изображения в виде одного большого файла в стандартных графических форматах.

Проводимая на компьютере навигация по полученным подобным образом оцифрованным слайдам способна полностью воспроизвести процесс исследования гистологических препаратов с помощью светового микроскопа: изучаемые участки изображения могут выбираться при перемещении виртуального слайда, увеличиваться или уменьшаться в масштабе с той же эффективностью.

К бесспорным преимуществам виртуальных гистологических препаратов относятся [25, 44, 47]: а) возможность стандартизировать изображения гистологических структур с высоким качеством и сохранять их неограниченное время (виртуальные слайды никогда не ломаются, не теряются и не портятся со временем), получать обзорные изображения срезов органов (режим миниатюры), аннотировать изображения (текст, стрелки), обеспечить массовый доступ к редким препаратам; б) простота хранения (тре-

буется только место на сервере или ином носителе информации); в) удобство интеграции файлов в образовательные программы, лекционные презентации и тесты.

В рамках реализации вышеописанных подходов сканеры гистологических препаратов ведущих производителей отличаются особенностями оптических и механических систем микроскопов, программного управления сканированием и алгоритмов сжатия изображений; вследствие этого виртуальные файлы, полученные с помощью разных моделей, имеют различные графические форматы: *.svs/scn — Leica (США), *.mrxs — Zeiss (Германия), *.vsi — Olympus (Япония) и др. Поэтому многие производители гистологических сканеров предлагают программное обеспечение для просмотра изображений соответствующего формата (а также основных графических форматов), которое может быть установлено локально на компьютерах пользователей (например, OlyVIA — Olympus, Aperio ImageScore — Leica). Для универсального доступа к виртуальным слайдам разных форматов разработаны специализированные программные пакеты, размещаемые на серверах, позволяющие пользователям проводить виртуальную микроскопию (OpenSlide, WebMicroscope, VIRMIC и др.), а также количественный анализ изображений (ImageJ, QuPath) в своих веб-браузерах [15, 27, 40, 48, 52]. Подобные программы, не являясь полностью универсальными, поддерживают достаточный набор (8 и более) графических форматов и позволяют проводить анализ общедоступных баз виртуальных изображений из нескольких источников [56].

Международный опыт использования технологии WSI в изучении гистологии

Двадцатилетний опыт внедрения виртуальной микроскопии в преподавание нормальной и патологической гистологии свидетельствует, что она является чрезвычайно полезным инструментом обучения, способным стать реальной альтернативной традиционной световой микроскопии [21, 26, 39, 44, 45, 47].

а) *Технические решения.* Первыми образовательными центрами, внедрившими виртуальную микроскопию в преподавание гистологии в 1999–2005 гг., явились медицинские факультеты ряда университетов США [16, 30, 35, 54]. Коллекции виртуальных слайдов создавались путем «сшивки» отдельных полей зрения препарата в единый графический файл; исходные или обработанные для уменьшения объема файлы хранились на серверах, жестких дисках компьютеров

или CD-ROM-дисках; визуализация осуществлялась по локальной сети или на отдельных компьютерах с помощью специализированных программ просмотра. Приобретенный начальный опыт использования методов WSI в преподавании нормальной и патологической гистологии обобщен в коллективной монографии *Virtual Microscopy and Virtual Slides in Teaching, Diagnosis and Research* [53]. Сдерживающими моментами для широкого распространения данной технологии в этот период явились недостаточная производительность персональных компьютеров, лимитированные объемы памяти серверов, отсутствие единых стандартов получения изображений и программ их просмотра, а также сетевые ограничения [17, 43, 44].

В последнее десятилетие по мере расширения использования сканеров гистологических препаратов в клинической медицине и увеличения их доступности для целей образования, а также в связи с ускоренным развитием сетевых технологий и широкополосного Интернета, ростом мощности компьютерных систем и качества воспроизводимых на дисплеях изображений сформировался современный стандарт использования WSI-технологий в преподавании нормальной и патологической гистологии. Он включает: 1) создание коллекций высококачественных изображений микроскопических препаратов с помощью гистологических сканеров; 2) формирование оптимальной сетевой структуры образовательной организации, обеспечивающей возможность доступа обучающихся к виртуальным изображениям как во время занятий в кампусе, так и вне его по каналам Интернет [20, 47, 52]. При наличии устойчивого и скоростного соединения возможен более бюджетный вариант виртуальной микроскопии — использование в ходе лабораторных занятий изображений, загружаемых на терминалы пользователей в режиме online из депозитариев виртуальных препаратов, находящихся в открытом доступе [37].

Конкретные детали технической реализации сетевых решений в каждом случае определяются моделями используемых сканеров, потребностями и количеством пользователей, структурой и протоколами информационной системы организации, бюджетом проекта. Они могут варьировать от использования стандартного набора оборудования и программных средств одного производителя (гистологический сканер, сервер для хранения виртуальных слайдов данного формата, обеспечивающий просмотр изображений в локальной сети с помощью специализированной программы и внешний доступ к ресурсам)

[23, 46] до разработки универсальных платформ, способных интегрировать файлы основных форматов сканирования и обеспечить доступ к ним с любой модели компьютерной техники (стационарные компьютеры, смартфоны и планшеты на базе Windows, iOS и Android) [20, 52].

б) *Интеграция виртуальной микроскопии в учебный процесс.* Наряду с совершенствованием технологий WSI, происходило накопление опыта интеграции данного подхода в существующие алгоритмы преподавания. F. P. Paulsen и соавт. [45] предложена концепция трехэтапного развития цифрового образовательного контента: 1) создание цифровых коллекций статичных изображений гистологических препаратов, 2) внедрение виртуальной микроскопии с использованием всех преимуществ, предлагаемых этой технологией, 3) формирование образовательных ресурсов, интегрирующих микроскопические изображения с другим анатомическим, рентгенологическим и клиническим контентом в режиме online.

В различных университетах апробированы варианты как частичной интеграции виртуальной микроскопии при сохранении световой микроскопии для отдельных аспектов курса [30, 51], так и полного замещения световых микроскопов виртуальными технологиями. Последний вариант в связи с его явными дидактическими и логистическими преимуществами выглядит более предпочтительным: как правило, образовательные центры, вступившие на путь внедрения WSI-технологий, закономерно (быстро или постепенно) отказываются от световой микроскопии [25, 31, 47, 56]. Полный переход к виртуальной микроскопии в зависимости от технической, организационной готовности проекта и выделенных под него ресурсов, а также особенностей реализации учебных программ, занимает от 1–2 [16, 35, 38, 52] до 3–5 лет [24, 50, 54].

Поскольку процесс внедрения WSI-технологий является по своей сути междисциплинарной задачей, для ее успешной реализации ключевое значение имеют организационные аспекты [7, 52, 56]. Руководителем проекта должен быть морфолог, компетентный в информационных технологиях и способный аргументированно обосновать его необходимость перед исполнительным руководством, а в ходе реализации — наладить эффективное взаимодействие с коллегами-педагогами, техническим, административным персоналом и IT-специалистами. Чрезвычайно важную роль играет наличие в коллективе «критической массы» сотрудников, способных разрабатывать и использовать в своей работе новые информационные технологии [6].

в) *Образовательные ресурсы виртуальной микроскопии.* К настоящему времени университетами США, Европы и Австралии сформированы достаточные по объему Web-ресурсы, представляющие аннотированные библиотеки виртуальных гистологических препаратов; доступ обучающихся обеспечивается через специализированные программы просмотра WSI-файлов с удобным пользовательским интерфейсом [20] по паролю для входа после регистрации в системе. Одновременно достаточно большой массив WSI-файлов находится в открытом доступе и может быть рекомендован студентам отечественных медицинских вузов для самостоятельной работы. Наиболее перспективными для использования в этом направлении представляются следующие ресурсы:

1. **Histology Guide** (<http://histologyguide.com/index.html>). Наиболее удобный по навигации и продвинутый по наполнению и наглядности англоязычный ресурс для изучения общей и частной гистологии. Коллекция виртуальных препаратов (Slide Box) содержит 250 слайдов, распределенных на 20 разделов (8 — по общей и 12 — по частной гистологии), каждый препарат снабжен описанием и системой поиска отдельных структур на разных увеличениях. Каждому разделу коллекции соответствует набор электронных микрофотографий (200 слайдов) с системой перекрестных ссылок со светооптическими изображениями. Отдельный раздел (Quiz) служит для проведения самоконтроля знаний основных препаратов. Сайт снабжен удобной системой поиска, файлы быстро грузятся, навигация на разных увеличениях проводится в браузере без использования специальной программы просмотра.

2. **Michigan Histology and Virtual Microscopy Learning Resources** (<http://histology.medicine.umich.edu>). Коллекция Мичиганского университета (США) содержит 224 виртуальных слайда и 124 электронные микрофотографии (программа просмотра WebScope).

3. **Iowa Virtual Slidebox** (<https://www.mbf-bioscience.com/iowavirtualslidebox>). Коллекция более 1000 виртуальных слайдов для преподавания гистологии и гистопатологии, в том числе 194 слайда по 15 разделам микроскопической анатомии. Доступ и навигация осуществляются через бесплатную программу Biolucida Cloud Viewer, загружаемую на компьютер пользователя.

4. **Virtual Histology** (<https://cps.med.ubc.ca/virtual-histology/>). Ресурс Университета Британской Колумбии (Канада), содержащий 210 виртуальных препаратов по общей и частной гистологии, сгруппированных в 30 разделов.

5. **Mainz Histo Maps** (<http://www.mhm.uni-mainz.de/>) Коллекция 100 виртуальных слайдов органов человека и лабораторных животных для изучения микроскопической анатомии (Университет И.Гутенберга, г. Майнц, Германия).

Специально для специалистов в области морфологии Американской ассоциацией анатомов (AAA) создан специализированный онлайн WSI-ресурс **The Virtual Microscopy Database** (<http://www.virtualmicroscopydatabase.org/>), обеспечивающий свободный доступ педагогов и научных работников к коллекциям виртуальных слайдов по нормальной и патологической гистологии 15 университетов из 4 стран. Для получения доступа необходима предварительная однократная регистрация. В настоящее время сайт VMD включает более 2600 файлов виртуальной микроскопии и более 500 зарегистрированных пользователей из 56 государств. Специалисты могут просматривать все виртуальные образы через программу Biolucida, захватывать любое изображение с экрана или загружать файлы изображений для локального использования в образовательных целях [33].

г) *Влияние WSI-технологий на качество знаний, оценка студентами и преподавателями.* В ряде университетов, внедривших технологии WSI, проведены сравнительные исследования успеваемости студентов при изучении нормальной гистологии посредством виртуальной и световой микроскопии. На основании анализа достаточных по объему и репрезентативности выборок показано, что при выполнении заданий по идентификации структуры тканей (лабораторный экзамен) при использовании технологии WSI итоговые баллы студентов были значимо выше, чем при работе со световым микроскопом [29, 31, 35, 39, 41, 51] или со статическими цифровыми изображениями гистологических препаратов [42]. Согласно одним наблюдениям, различий в итогах комплексного тестового экзамена по гистологии (включающего общетеоретическую и практическую части) не выявлено, на основании чего авторы делают вывод, что получение гистологических знаний не зависит от режима микроскопии, используемого в ходе учебы [41]. L. Helle и соавт. [31] показано, что предоставление студентам возможности доступа к высококачественным оцифрованным материалам без достаточной мотивации к обучению не гарантирует повышение их итоговой компетенции по всему курсу гистологии; эти наблюдения хорошо коррелируют с выводами группы авторов о важной роли мотивационного компонента в успешности освоения данной дисциплины [22]. Однако результаты других исследований [14, 35, 44] свидетельствуют о пози-

тивном эффекте обучения с помощью виртуальной микроскопии на итоговые результаты экзаменов.

В целом, исследования по оценке эффекта использования технологии WSI дали положительные результаты: ее внедрение способствует развитию у студентов устойчивых навыков распознавания гистологических структур, что обеспечивает сохранение необходимого уровня освоения предмета или даже его улучшение [47].

Наряду с вышеприведенным анализом, многие образовательные центры оценивали мнение студентов и преподавателей о виртуальной микроскопии. Результаты анкетирования свидетельствуют об однозначно положительной оценке данной технологии обучающимися, большинство опрошенных (85–93%) предпочли ее классической световой микроскопии [13, 18, 34, 35, 47]. По мнению студентов, наиболее важными положительными моментами являются: доступ к изображениям высокого качества, удобство в навигации, более легкое восприятие сложного учебного материала, повышение производительности работы, развитие навыков работы в группе, возможность самостоятельно работать с виртуальными слайдами в любое время и из любого места.

Преподаватели также в основном положительно оценили данную технологию, позволяющую им более эффективно проводить занятия за счет уменьшения непроизводительных затрат времени на решение технических проблем микроскопии, повысить наглядность преподавания, увеличить время для содержательного обсуждения вопросов со студентами [24, 29, 35, 50].

При обсуждении эффективности виртуальной микроскопии в преподавании регулярно высказываются опасения, что данная технология не позволяет студентам приобретать устойчивые навыки работы с классическим световым микроскопом. На наш взгляд, этот момент не критичен: подавляющее большинство выпускников в своей профессиональной деятельности не используют компетенции световой микроскопии; для врача любого профиля более важен универсальный навык знания микроскопического строения нормальных и патологически измененных органов, а виртуальная микроскопия — идеальный инструмент для его развития [2, 47]. Кроме того, обучение базовым умениям световой микроскопии вполне реально совместить с работой с виртуальными препаратами за счет рационального планирования практических занятий [7], возможным компромиссным вариантом является разработка специальных периферийных устройств к компьютеру, моделирующих навыки перемещения препара-

та на предметном столике светового микроскопа [2].

Технологии WSI в российском высшем медицинском образовании

В настоящее время на кафедрах гистологии российских медицинских вузов сформированы и широко используются в учебном процессе образовательные ресурсы, реализующие возможности цифровых технологий визуализации микроскопических структур и интегрированные в кафедральные учебно-методические комплексы различного объема и степени сложности [3, 4, 6, 10–12]:

а) систематизированные коллекции микротографий, видеофайлов, обучающих фильмов, анимационных роликов, мультимедийных презентаций;

б) демонстрация в ходе практических занятий реальных микроскопических препаратов с помощью цифровых микроскопов, транслирующих их изображение на экран компьютерных мониторов или стационарных видеосистем;

в) Интернет-ресурсы (компьютерные обучающие программы, электронные атласы, мультимедийные образовательные видеоролики по изучению гистологических препаратов) в режимах как корпоративного (образовательный портал вуза), так и открытого доступа.

Несомненно, внедрение виртуальной микроскопии должно явиться логическим продолжением этой устойчивой тенденции.

Возможности использования в учебном процессе технологии сканирования и «сшивания» по кадрам целых микропрепаратов или крупных их фрагментов обсуждались в среде российских морфологов (включая демонстрацию в тестовом режиме) с 2008 г.¹, однако полноценное развитие данного направления на тот момент сдерживалось техническими сложностями его реализации (высокая трудоемкость, ограниченные возможности камер для захвата изображений, недостаточный уровень быстродействия и поддержки качественной графики массовыми компьютерами). По мере технологического преодоления этих ограничений и повышения доступности систем сканирования для нужд образования на кафедрах гистологии ряда медицинских вузов (Ярославский и Уральский ГМУ, ПГМУ им. И. М. Сеченова, МГМСУ им. А. И. Евдокимова) существенно активизировались инициативные разработки по развитию WSI-технологий, опыт и перспек-

¹ Павлов А. В. Виртуальная гистология: использование информационных технологий в образовании (устный доклад). IX Конгресс Международной Ассоциации морфологов (Республика Узбекистан, г. Бухара, 14–16 мая 2008 г.).

тивы использования виртуальной микроскопии в учебном процессе активно обсуждаются на авторитетных всероссийских и международных научных конференциях.¹ Однако повсеместно преподавание предмета продолжает строиться на основе визуализации тканевых структур с помощью световой микроскопии, а виртуальные микропрепараты по отдельным разделам курса рассматриваются как важное дополнение, повышающее наглядность преподавания и доступ студентов к образовательным ресурсам при подготовке к занятиям и экзаменам [1, 8–10].²

Для российских вузов ускоренное внедрение методики WSI представляется особенно актуальным: текущее состояние материальной базы морфологических кафедр, обеспечивающей визуальный доступ студентам к микроскопическим образцам (парк микроскопов, фонд микропрепаратов), далеко от идеального и требует серьезной модернизации. В каждом конкретном случае выбор оптимального варианта решения этой задачи должен опираться на комплексный анализ преимуществ и ограничений существующих подходов к визуализации микроструктур как в краткосрочной (готовность к реализации, финансовые ресурсы, технологические и организационные аспекты), так и в среднесрочной (мировые тенденции развития медицинского образования в информационную эру) перспективах [5].

В Ярославском государственном медицинском университете с 2017 г. организована планомерная работа по полномасштабному внедрению виртуальной микроскопии в учебный процесс в качестве реальной альтернативы традиционным методам визуализации с помощью световой микроскопии. При выборе этого варианта развития мы опирались на международный опыт применения технологий WSI, имеющиеся разработки в данной сфере, развитую информационную инфраструктуру университета, наличие на кафедре современной цифровой образовательной среды и достаточного количества преподавателей, заинтересованных в ее развитии, поддержке руководства вуза.

¹ Всероссийская конференция «Гистогенез, реактивность и регенерация тканей» (Санкт-Петербург, 5–6 апреля 2018 г.); XIV Конгресс Международной Ассоциации морфологов (г. Астрахань, 19–22 сентября 2018 г.); Научно-практическая конференция с международным участием «Общегистологические аспекты современной медицины» (г. Воронеж, 15–18 ноября 2018 г.).

² Яцковский А. Н., Пашин С. С. Технологии обучения: от микроскопии традиционной к микроскопии виртуальной (устный доклад). X Международная научная конференция «Бабухинские чтения в г. Орле» (г. Орел, 31 мая–1 июня 2017 г.).

Выбор технологической схемы реализации проекта произведен на основе имеющихся ресурсных возможностей [7]:

1. WSI-коллекции гистологических препаратов создаются с помощью сканера гистологических препаратов VS120-S5 (OLYMPUS, Япония) в формате Virtual Slide Image (.vsi) на базе межкафедральной лаборатории цифровой микроскопии.

2. Цифровой контент локализован на центральном сервере локальной сети университета, работа на терминалах пользователей в учебных классах (технология «тонкий клиент») производится по протоколу удаленного доступа с помощью программы OLYMPUS OlyVIA, позволяющей также просматривать графические файлы других распространенных форматов (jpg, tif и др.).

3. Для навигации по базовой коллекции гистологических препаратов создан электронный практикум «Виртуальная гистология для будущих врачей» (v.1.0) — первая отечественная разработка, позволяющая проводить виртуальную микроскопию в разных режимах (практикум, итоговое занятие, экзамен).

4. Проведена техническая модернизация учебных помещений из расчета 1 терминал пользователя/2 студента: каждый из 4 классов, рассчитанный на 16 обучающихся, оборудован 1 демонстрационной компьютерной видеосистемой (жидкокристаллический телевизор с диаметром экрана 50'', системный блок) и 9 рабочими местами (8 — для студентов и 1 — для преподавателя).

Одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов является формирование коллекций высококачественных виртуальных препаратов. Это связано с высокими требованиями, предъявляемыми к исходным образцам для обеспечения максимальной репрезентативности представления структуры нормального органа (ткани) с дидактических позиций: удачная плоскость и оптимальная толщина среза, качественная окраска, отсутствие артефактов, равномерная резкость всех участков препарата. Это требует проведения предварительного изучения большого массива микропрепаратов из разных источников (кафедральные учебные и научные коллекции, наборы микропрепаратов отечественных и зарубежных производителей) с целью отбора образцов, удовлетворяющих всем вышеуказанным требованиям. С учетом высокой чувствительности сканера к качеству и толщине предметных стекол получить «идеальный» цифровой препарат после сканирования предварительно отобранных образцов удается в среднем в 70–75% случаев. В результате напряженной работы команды проекта (А. В. Павлов, Е. А. Крайнова, С. А. Костров,

Т. В. Кораблева, О. А. Фоканова — ЯГМУ, А. Н. Яцковский — ПГМУ им. И. М. Сеченова) сформирована и внедрена в учебный процесс базовая коллекция из 200 виртуальных препаратов (графические форматы vsi и jpg) по всем разделам курса (50 — по общей и 150 — по частной гистологии).

С начала 2018/2019 учебного года нами впервые в российских медицинских вузах проведен полный переход со световой на виртуальную микроскопию обучающихся по программам «Лечебное дело», «Педиатрия» и «Стоматология» (включая сдачу итогового экзамена в данном формате). Комбинированный подход (световая + виртуальная микроскопия) сохранен только при реализации программы «Медицинская биохимия», так как работа со световым микроскопом является важной профессиональной компетенцией выпускника по данной специальности. Поскольку изменился лишь способ визуализации микроскопических структур, традиционная организация практических занятий при переходе к виртуальной микроскопии полностью сохранилась. В то же время, в работе кафедры возникли новые логистические моменты: с одной стороны, существенно снизился объем технической работы по подготовке занятий (отбор препаратов, обслуживание парка микроскопов), с другой — возросла потребность в организации текущего сопровождения работы учебных классов администратором локальной вычислительной сети вуза.

Одним из позитивных результатов перехода к виртуальной микроскопии явилось расширение возможностей самостоятельной работы студентов с коллекциями микропрепаратов во внеучебное время, поскольку доступ к ним стал возможен не только с рабочих мест на кафедре, но и из общеуниверситетских компьютерных классов. Первые итоги проведенной работы свидетельствуют об эффективности данной технологии и высокой заинтересованности обучающихся и преподавателей в ее использовании. В 2019–2020 гг. запланировано проведение ряда мероприятий по развитию проекта: обеспечение Интернет-доступа обучающихся к базовой коллекции виртуальных слайдов через SQL-сервер, увеличение количества и повышение качества цифровых препаратов, создание специализированных коллекций для элективных разделов курса, проведение анализа влияния внедрения технологии WSI на успеваемость студентов.

При планировании подобных проектов очень важным моментом является определение объема необходимых финансовых ресурсов для их успешной реализации. В настоящее

время стоимость модернизации учебных классов оказалась вполне сопоставима с ценой комплектации их современными микроскопами; терминалы пользователей могут работать не только в режиме виртуальной микроскопии, но и для мультимедийного сопровождения учебного процесса и тестирования знаний; исчезает необходимость регулярной закупки дорогостоящих учебных препаратов. Приобретение сканера гистологических препаратов — более долгосрочная инвестиция на уровне вуза, позволяющая достаточно быстро сформировать «единое цифровое пространство» для всех дисциплин, связанных с микроскопическими изображениями (биология, гистология, патологическая анатомия, нормальная и патологическая физиология, микробиология, клиническая лабораторная диагностика) и обеспечить преемственность преподавания на смежных теоретических и профильных клинических кафедрах, а также в системе дополнительного профессионального образования.

Другим веским стратегическим аргументом в пользу ускоренного внедрения виртуальной микроскопии является необходимость соответствовать современным тенденциям развития патологической морфологии и телемедицины [2, 21, 56]. С 2017 г. в США использование WSI-файлов разрешено не только для экспертной оценки, но и для первичной морфологической диагностики; в ближайшие годы диагностическая информативность виртуальной микроскопии будет существенно возрастать за счет внедрения алгоритмов цифрового анализа изображений и искусственного интеллекта [19, 56]. В рамках реализации Национального проекта «Здравоохранение» в 2019–2024 гг. запланировано создание сети референс-центров второго экспертного мнения, оснащенных системами сканирования гистологических препаратов и связанных с региональными патолого-анатомическими бюро.¹ Иными словами, технологии WSI в патологической морфологии очень скоро станут стандартной и доступной процедурой, поэтому начинать готовить будущих специалистов к новой цифровой реальности необходимо уже сейчас.

Для успешного развития данного направления большую актуальность приобретает создание отечественных электронных учебных пособий по гистологии на основе технологий виртуальной микроскопии и депозитариев виртуальных учебных препаратов, позволяющим кафедрам активно использовать их в учебном процессе;

¹ Паспорт Национального проекта «Здравоохранение» [<http://government.ru/projects/selection/736/35561/>].

в рамках развития системы непрерывного профессионального образования преподавателей назрела необходимость создания циклов повышения квалификации морфологов в сфере WSI-технологий.

Заключение. Технологии виртуальной микроскопии в преподавании гистологии имеют ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с классической световой микроскопией как в тактическом (обеспечение высокого качества наглядности преподавания, соответствие современному техническому уровню визуализации микрообъектов и ожиданиям «цифрового» поколения студентов, достаточная экономическая эффективность в условиях ограниченной в ресурсах материальной базы образования), так и стратегическом (соответствие мировым трендам медицинского образования, перспективы интеграции внутри предмета и между дисциплинами, развитие цифровой патологии и телемедицины, новые возможности дистанционного образования врачей) аспектах.

Переход к технологиям WSI в полной мере соответствует программе развития российского электронного медицинского образования и Национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации» 2019–2024 гг.^{1, 2} Реализация подобных комплексных проектов, требующих скоординированной работы морфологов, IT-специалистов и исполнительного руководства, может явиться значимым стимулом для развития творческого потенциала профессорско-преподавательского состава и привлечения целеустремленной талантливой молодежи в фундаментальную медицину. Нарботанный к настоящему времени международный опыт применения виртуальной микроскопии в медицинском образовании и наличие на отечественном рынке медицинской техники современных программно-аппаратных средств для ее реализации создают объективные предпосылки для ускоренной интеграции данной технологии в практику работы морфологических кафедр.

ЛИТЕРАТУРА

¹ Глыбочко П. В., Серова Н. С. Цифровое образование в медицине (устный доклад). Совместное заседание Ассоциации «Совет ректоров медицинских и фармацевтических высших учебных заведений» и Постоянного Совета Российско-Китайской ассоциации медицинских университетов (г. Екатеринбург, 9 ноября 2018 г.).

² Литвинова Т. М. Электронное медицинское образование в России: возможности и перспективы (устный доклад). Общее собрание Ассоциации «Совет ректоров медицинских и фармацевтических высших учебных заведений» (Москва, 3 апреля 2019 г.).

1. Волкова Л. В., Соловьева Л. М., Ворожейкин В. М. Преемственность в обучении патологической анатомии и гистологии на современном этапе // *Междунар. журн. эксперим. образования*. 2014. Т. 3, № 2. С. 118–119 [Volkova L. V., Solov'eva L. M., Vorozheikin V. M. Continuity in training of pathological anatomy and histology at the current stage // *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2014. Vol. 3, № 2. P. 118–119. In Russ.].
2. Жакота Д. А., Туманова Е. Л., Корчагина Н. С. Возможности технологии Whole slide imaging в медицинском образовании // *Мед. образован. и проф. развитие*. 2019. Т. 10, № 1. С. 55–64 [Zhakota D. A. Tumanova E. L. Korchagina N. S. Possibilities of whole slide imaging technology in medical education // *Meditsinskoe obrazovanie i professional'noe razvitie*. 2019. Vol. 10, № 1. P. 55–64. In Russ.]. doi: 10.2441 1/2220–8453–2019–11006
3. Кузнецов С. Л., Боронихина Т. В., Горячкина В. Л., Иванова М. Ю., Карташкина Н. Л., Яцковский А. Н. Компьютерные технологии в преподавании гистологии на английском языке // *Морфология*. 2015. Т. 147, вып. 3. С. 74–75. [Kuznetsov S. L., Boronihina T. V., Goryachkina V. L., Ivanova M. Yu., Kartashkina N. L., Yatskovskii A. N. Computer technologies in teaching histology in English // *Morfologiya*. 2015. Vol. 147, № 3. P. 74–75. In Russ.].
4. Могильная Г. М., Евглевский А. А., Пейливаньян Э. Г., Фомичева Е. В., Алифанова Г. Ф., Ковтуновская И. В. Комплексное инновационное обеспечение учебного процесса как средство повышения эффективности преподавания цитологии, гистологии и эмбриологии // *Междунар. журн. прикл. и фундамент. исслед.* 2016. № 4–1. С. 234–236 [Mogil'naya G. M., Evglevskii A. A., Pejlivan'yan Je. G., Fomicheva E. V., Alifanova G. F., Kovtunovskaya I. V. Complex innovative ensuring of educational process as means of increase in efficiency of teaching cytology, histology and embryology // *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2016. № 4. P. 234–236. In Russ.].
5. Павлов А. В. Виртуальная микроскопия в преподавании гистологии: от теории к практике // *Морфология*. 2018. Т. 153, вып. 3. С. 211 [Pavlov A. V. Virtual microscopy in teaching histology: from the theory to practice // *Morfologiya*. 2018. Vol. 153. № 3. P. 211. In Russ.].
6. Павлов А. В., Гансбургский А. Н. Опыт проектирования современной образовательной среды на кафедре гистологии: подходы, результаты, перспективы // *Морфология*. 2012. Т. 141, вып. 2. С. 68–72 [Pavlov A. V., Gansburgskij A. N. Experience of design of the modern educational environment at department of histology: approaches, results, prospects // *Morfologiya*. 2012. Vol. 141, № 2. P. 68–72. In Russ.].
7. Павлов А. В., Крайнова Е. А., Костров С. А., Фоканова О. А., Кораблева Т. В. Переход к преподаванию гистологии на основе технологии whole slide imaging: технические и организационные аспекты // *Вестн. новых мед. технологий*. 2018. Т. 25, № 3. С. 194–197 [Pavlov A. V., Krainova E. A., Kostrov S. A., Fokanova O. A., Korableva T. V. Transition to teaching histology on the basis of whole slide imaging technology: technical and organizational aspects // *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*. 2018. Vol. 25, № 3. P. 194–197. In Russ.].
8. Рыхлик С. В. Современные подходы к преподаванию гистологии, цитологии и эмбриологии // *Вісник проблем біології і медицини*. 2014. Т. 2 (111), № 3. С. 70–74 [Rykhlik S. V. Modern approaches in histology, cytology and embryology teach-

- ing // *Visnik problem biologii i meditsiny*. 2014. Vol. 2 (111), № 3. P. 70–74. In Russ.].
9. Сазонов С.В. Оцифрованные гистологические препараты в обучении и отработке практических навыков и умений при изучении гистологии в медицинском вузе // *Вестн. Витебск. гос. мед. ун-та*. 2017. Т. 16, № 4. С. 127–131 [Sazonov S.V. The digitized histologic slides in training and practicing skills and abilities during studying histology in medical school // *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*. 2017. Vol. 16, № 4. P. 127–131. In Russ.].
 10. Сазонов С.В., Береснева О.Ю., Курумчина С.Г. Цифровые технологии в изучении гистологии // *Вопр. морфологии XXI века*. Вып.5. СПб.: ДЕАН, 2018. С. 303–306 [Sazonov S.V., Beresneva O.Yu., Kurumchina S.G. Digital technologies in studying of histology // *Voprosy morfologii XXI veka*. Vol. 5. SPb.: DEAN, 2018. P. 303–306. In Russ.].
 11. Стадников А.А., Шевлюк Н.Н., Семченко Ю.П., Блинова Е.В., Ковбык Л.В., Солодовников В.В. О месте и значимости традиционных и инновационных методов реализации принципа наглядности в процессе обучения студентов на кафедрах гистологии, цитологии и эмбриологии медицинских вузов // *Вопр. морфологии XXI века*. Вып.3. СПб.: ДЕАН, 2012. С. 137–140 [Stadnikov A.A., Shevlyuk N.N., Semchenko Yu.P., Blinova E.V., Kovbyk L.V., Solodovnikov V.V. About the place and the importance of traditional and innovative implementation methods of the principle of visibility in the course of training of students at departments of histology, cytology and embryology of medical schools // *Voprosy morfologii XXI veka*. Vol. 3. SPb.: DEAN, 2012. P. 137–140. In Russ.].
 12. Шестакова В.Г., Костюничева Н.А., Ганина Е.Б., Донсков С.А. Компетентностный и интегрированный подход в преподавании морфологических дисциплин // *Вопр. морфологии XXI века*. Вып.5. СПб.: ДЕАН, 2018. С. 313–314 [Shestakova V.G., Kostyunicheva N.A., Ganina E.B., Donskov S.A. Competence-based and integrated approach in teaching morphological disciplines // *Voprosy morfologii XXI veka*. Vol. 5. SPb.: DEAN, 2018. P. 313–3314. In Russ.].
 13. Alotaibi O., ALQahtani D. Measuring dental students' preference: A comparison of light microscopy and virtual microscopy as teaching tools in oral histology and pathology // *Saudi Dent. J.* 2016. Vol. 28, № 4. P. 169–173.
 14. Anyanwu G.E., Agu A.U., Anyaehie U.B. Enhancing learning objectives by use of simple virtual microscopic slides in cellular physiology and histology: impact and attitudes // *Adv. Physiol. Educ.* 2012. Vol. 36, № 2. P. 158–163. doi: 10.1152/advan.00008.2012
 15. Bankhead P., Loughrey M.B., Fernandez J.A., Dombrowski Y., McArt D.G., Dunne P.D., McQuaid S., Gray R.T., Murray L.J., Coleman H.G., James J.A., Salto-Tellez M., Hamilton P.W. QuPath: open source software for digital pathology image analysis // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, № 1. P. 16878.
 16. Blake C.A., Lavoie H.A., Millette C.F. Teaching medical histology at the University of South Carolina School of Medicine: Transition to virtual slides and virtual microscopes // *Anat. Rec. B New Anat.* 2003. Vol. 275, № 1. P. 196–206.
 17. Bloodgood R.A. The use of microscopic images in medical education. In: *Virtual Microscopy and Virtual Slides in Teaching, Diagnosis, and Research* (ed. J. Gu, R. W. Ogilvie). Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2005. P. 111–149.
 18. Boutonnat J., Paulin C., Faure C., Colle P.E., Ronot X., Seigneurin D. A pilot study in two French medical schools for teaching histology using virtual microscopy // *Morphologie*. 2006. Vol. 90 (288). P. 21–25.
 19. Boyce B.F. An update on the validation of whole slide imaging systems following FDA approval of a system for a routine pathology diagnostic service in the United States // *Biotech. Histochem.* 2017. Vol. 92, № 6. P. 381–389.
 20. Brochhausen C., Winther H.B., Hundt C., Schmitt V.H., Schömer E., Kirkpatrick C. J. A Virtual Microscope for Academic Medical Education: The Pate Project // *Interact. J. Med. Res.* 2015. Vol. 4, № 2. P. e11. doi: 10.2196/ijmr.3495
 21. Bueno G., Fernández-Carrobles M.M., Deniz O., García-Rojo M. New Trends of Emerging Technologies in Digital Pathology // *Pathobiology*. 2016. Vol. 83, № 2–3. P. 61–69.
 22. Campos-Sánchez A., López-Núñez J.A., Carriel V., Martín-Piedra M.Á., Sola T., Alaminos M. Motivational component profiles in university students learning histology: a comparative study between genders and different health science curricula // *BMC Med. Educ.* 2014. Vol. 14. P. 46. doi: 10.1186/1472-6920-14-46
 23. Chen Y.K., Hsue S.S., Lin D.C., Wang W.C., Chen J.Y., Lin C.C., Lin L.M. An application of virtual microscopy in the teaching of an oral and maxillofacial pathology laboratory course // *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod.* 2008. Vol. 105, № 3. P. 342–347.
 24. Fonseca F.P., Santos-Silva A.R., Lopes M.A., Almeida O.P., Vargas P.A. Transition from glass to digital slide microscopy in the teaching of oral pathology in a Brazilian dental school // *Med. Oral Patol. Oral Cir. Bucal.* 2015. Vol. 20, № 1. P. e17–22.
 25. Foster K. Medical education in the digital age: Digital whole slide imaging as an e-learning tool // *J. Pathol. Inform.* 2010. Vol. 1. P. 14. doi: 10.4103/2153–3539.68331
 26. Glatz-Krieger K., Spornitz U., Spatz A., Mihatsch M.J., Glatz D. Factors to keep in mind when introducing virtual microscopy // *Virchows Arch.* 2006. Vol. 448, № 3. P. 248–255.
 27. Goode A., Gilbert B., Harkes J., Jukic D., Satyanarayanan M. OpenSlide: a vendor-neutral software foundation for digital pathology // *J. Pathol. Inform.* 2013. Vol. 4. P. 27. doi: 10.4103/2153-3539.119005
 28. Gu J., Ogilvie R.W. The coming age of virtual microscopy: current technologies and their applications. In: *Virtual Microscopy and Virtual Slides in Teaching, Diagnosis, and Research* (ed. J. Gu, R. W. Ogilvie). Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2005. P. 1–6.
 29. Hamilton P.W., Wang. Y., McCullough S.J. Virtual microscopy and digital pathology in training and education // *APMIS*. 2012. Vol. 120, № 4. P. 305–315. doi: 10.1111/j.1600-0463.2011.02869.x
 30. Heidger P.M. Jr., Dee F., Consoer D., Leaven T., Duncan J., Kreiter C. Integrated approach to teaching and testing in histology with real and virtual imaging // *Anat. Rec.* 2002. Vol. 269, № 2. P. 107–112.
 31. Helle L., Nivala M., Kronqvist P. More Technology, Better Learning Resources, Better Learning? Lessons from Adopting Virtual Microscopy in Undergraduate Medical Education // *Anat. Sci. Educ.* 2013. Vol. 6, № 2. P. 73–80. doi: 10.1002/ase.1302
 32. Higgins C. Applications and challenges of digital pathology and whole slide imaging // *Biotech. Histochem.* 2015. Vol. 90, № 5. P. 341–347.
 33. Hortsch M. Sharing Virtual Histology Images Worldwide — The Virtual Microscopy Database // *J. Cytol. Histol.* 2017. Vol. 8, № 5. P. e120. doi: 10.4172/2157-7099.100e120

34. Husmann P.R., O'Loughlin V.D., Braun M.W. Quantitative and qualitative changes in teaching histology by means of virtual microscopy in an introductory course in human anatomy // *Anat. Sci. Educ.* 2009. Vol. 2, № 5. P. 218–226. doi: 10.1002/ase.105
35. Krippendorf B.B., Lough J. Complete and rapid switch from light microscopy to virtual microscopy for teaching medical histology // *Anat. Rec. B New Anat.* 2005. Vol. 285, № 1. P. 19–25.
36. Krupinski E.A., Johnson J.P., Jaw S., Graham A.R., Weinstein R.S. Compressing pathology whole-slide images using a human and model observer evaluation // *J. Pathol. Inform.* 2012. Vol. 3. P. 17. doi: 10.4103/2153-3539.95129
37. Kumar R.K., Freeman B., Velan G.M., De Permentier P.J. Integrating histology and histopathology teaching in practical classes using virtual slides // *Anat. Rec. B New Anat.* 2006. Vol. 289, № 4. P. 128–133.
38. Kumar R.K., Velan G.M., Korell S.O., Kandara M., Dee F.R., Wakefield D. Virtual microscopy for learning and assessment in pathology // *J. Pathol.* 2004. Vol. 204, № 5. P. 613–618.
39. Kuo K.H., Leo J.M. Optical Versus Virtual Microscope for Medical Education: A Systematic Review // *Anat. Sci. Educ.* 2018. Nov 10. doi: 10.1002/ase.1844 [Epub ahead of print]
40. Linkert M., Rueden C.T., Allan C., Burel J.M., Moore W., Patterson A., Loranger B., Moore J., Neves C., Macdonald D., Tarkowska A., Sticco C., Hill E., Rossner M., Eliceiri K.W., Swedlow J.R. Metadata matters: access to image data in the real world // *J. Cell. Biol.* 2010. Vol. 189, № 5. P. 777–782. doi:10.1083/jcb.201004104
41. Mione S., Valcke M., Cornelissen M. Evaluation of virtual microscopy in medical histology teaching // *Anat. Sci. Educ.* 2013. Vol. 6, № 5. P. 307–315. doi: 10.1002/ase.1353
42. Mione S., Valcke M., Cornelissen M. Remote histology learning from static versus dynamic microscopic images // *Anat. Sci. Educ.* 2016. Vol. 9, № 3. P. 222–230. doi: 10.1002/ase.1572
43. Pantanowitz L. Digital images and the future of digital pathology // *J. Pathol. Inform.* 2010. Vol. 1. P. 15. doi: 10.4103/2153-3539.68332
44. Pantanowitz L., Szymas J., Yagi Y., Wilbur D. Whole slide imaging for educational purposes // *J. Pathol. Inform.* 2012. Vol. 3. P. 46. doi: 10.4103/2153-3539.104908
45. Paulsen F.P., Eichhorn M., Bräuer L. Virtual microscopy – The future of teaching histology in the medical curriculum? // *Ann. Anat.* 2010. Vol. 192, № 6. P. 378–382. doi: 10.1016/j.aanat.2010.09.008
46. Pospíšilová E., Černochová D., Lichnovská R., Erdšová B., Krajčí D. Application and evaluation of teaching practical histology with the use of virtual microscopy // *Diagnostic Pathology.* 2013. Vol. 8 (Suppl. 1). S. 7.
47. Saco A., Bombi J.A., Garcia A., Ramirez J., Ordi J. Current Status of Whole-Slide Imaging in Education // *Pathobiology.* 2016. Vol. 83, № 2–3. P. 79–88.
48. Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // *Nat. Methods.* 2012. Vol. 9, № 7. P. 671–675.
49. Silage D.A., Gil J. Digital image tiles: a method for the processing of large sections // *J. Microsc.* 1985. Vol. 138 (Pt. 2). P. 221–227.
50. Szymas J., Lundin M. Five years of experience teaching pathology to dental students using the WebMicroscope // *Diagn. Pathol.* 2011. Vol. 6. Suppl 1. P. 13. doi: 10.1186/1746-1596-6-S1-S13
51. Tian Y., Xiao W., Li C., Liu Y., Qin M., Wu Y., Xiao L., H. Li. Virtual microscopy system at Chinese medical university: an assisted teaching platform for promoting active learning and problem-solving skills // *BMC Med. Educ.* 2014. Vol. 14. P. 74. doi: 10.1186/1472-6920-14-74
52. Vainer B., Mortensen N.W., Poulsen S.S., Sørensen A.H., Olsen J., Saxild H.H., Johansen F.F. Turning Microscopy in the Medical Curriculum Digital: Experiences from The Faculty of Health and Medical Sciences at University of Copenhagen // *J. Pathol. Inform.* 2017. Vol. 8. P. 11. doi: 10.4103/2153-3539.201919
53. *Virtual Microscopy and Virtual Slides in Teaching, Diagnosis, and Research* (ed. J. Gu, R. W. Ogilvie). 2005, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 356 p.
54. Weaker F.J., Herbert D.C. Transition of a Dental Histology Course from Light to Virtual Microscopy // *J. Dental Education.* 2009. Vol. 73, № 10. P. 1213–1221.
55. Weinstein R.S., Holcomb M.J., Krupinski E.A. Invention and Early History of Telepathology (1985–2000) // *J. Pathol. Inform.* 2019. Vol. 10. P. 1. doi: 10.4103/jpi.jpi_71_18
56. Zarella M.D., Bowman D., Aeffner F., Farahani N., Xthona A., Absar S.F., Parwani A., Bui M., Hartman D.J. A Practical Guide to Whole Slide Imaging: A White Paper From the Digital Pathology Association // *Arch. Pathol. Lab. Med.* 2019. Vol. 143, № 2. P. 222–234. doi: 10.5858/arpa.2018-0343-RA