

УДК: 621.317.715.5 + 681.587.7 + 681.5.075 + 550.34.038.6

**ПРИМЕНЕНИЕ ШЛЕЙФОВЫХ ГАЛЬВАНОМЕТРОВ СВЕТОЛУЧЕВЫХ
ОСЦИЛЛОГРАФОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-
МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МЕТОДУ ЧАХОТИНА
НА УСТАНОВКАХ ДЛЯ МИКРОПУЧКОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ ТКАНЕЙ
И КЛЕТОК: АЛЬТЕРНАТИВА ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКИХ СКАНЕРОВ
КГЦ-ДИАПАЗОНА?**

О.В. Градов^{1,2}, Зайцев Е.В.³, А.Г. Яблоков⁴

¹Институт Энергетических Проблем Химической Физики РАН

²American Physical Society, For. on the History of Phys.

³Российский химико-технологический университет им Д.И. Менделеева

⁴Российский национальный исследовательский
медицинский университет имени Н. И. Пирогова

UDC: 621.317.715.5 + 681.587.7 + 681.5.075 + 550.34.038.6

**APPLICATIONS OF LOOP GALVANOMETERS FROM THE LIGHT-
BEAM OSCILLOGRAPHS WITH ELECTRONIC SERVOCONTROL IN
TSCHACHOTIN'S MICROBEAM SETUPS FOR CELL & TISSUE
IRRADIATION WITH THE BEAM POSITION REGULATION: A
POSSIBLE LOW-COST ALTERNATIVE OF EXPENSIVE KHZ-BAND
GALVANOMETRIC MIRRORS.**

Gradov O.V. *, Zaytsev E.V.** , Jablokow A.G. ***

* Institute of Energy Problems of Chemical Physics;

*APS (For. on the History of Physics)

** Mendeleev University of Chemical Technology

***Pigorov Russian National Research Medical University

В работе дается технико-исторический обзор по использованию микропучковых технологий облучения клетки, начиная с работ С. Чахотина и до последнего времени, а также по использованию зеркальных гальванометров, фото-кимографов и шлейфовых / светолучевых осциллографов в биологических методах экспериментальной регистрации. На основе обзорно-аналитических и технико-физических предпосылок делаются выводы о возможности создания и автоматизации микропучковых технологий облучения клетки по С. Чахотину с использованием зеркальных гальванометров светолучевых осциллографов.

Ключевые слова: ультрафиолетовый микропучок, гальванометрический сканер, оптический микроманипулятор, светолучевой осциллограф, зеркальный гальванометр, гальванометрические зеркала, фотокимограф.

This paper provides a historical and technical review of the UV-microbeam technique application for living cell irradiation from the early Tschachotin's works up to nowadays and considers the use of mirror galvanometers, photokymographs and light-beam (optical) oscillographs for biological registration. From the above considerations we propose the possibility of design and automation of microbeam technologies for cell irradiation based on S. Tschachotin method using mirror galvanometers from light-beam oscillographs.

Key words: ultraviolet microbeam, light-ray oscillograph, light-beam oscillograph, radiopuncture microscopie, moving-coil oscillograph, galvanometric scanner, mirror galvanometer, photo-kymograph, optical trapping, optical tweezing.

Возникновение метода ультрафиолетового микропучка С. Чахотина.

Начиная с пионерских работ Чахотина по воздействию сфокусированных микропучков ультрафиолетового излучения на клетки [1-3], их органеллы или органоиды [4,5], а также цитоплазматические коллоиды, обеспечивающие фазовую физико-химическую адаптивность морфологии клетки [6,7], стало очевидным, что ультрафиолетовый микропучок является мощным и точным инструментом для задач экспериментальной цитологии и цитоморфологии [8].

Методы УФ радиопунктуры, как исходно называл их сам автор [2,9]¹, а впоследствии и иные авторы, работавшие над проблемой ультрафиолетового облучения в экспериментальной морфологии (в частности - фрау Анне Дюрке [10], продолжившая работы по влиянию УФ облучения на экспериментальный морфогенез сенсорных систем тритона, инициированные одним из основателей экспериментальной зооморфологии в Германии Бернаром Дюрке [11] в первой половине XX века), как выяснилось в ходе апробации, характеризуются значительно большими масштабами применимости, чем это предполагалось С. Чахотиным в первых работах.

Уже в 1930-х гг. им было показано, что УФ микропучок способен искусственно индуцировать партеногенез (и, как следствие этого, морфогенез) беспозвоночных [12-14]. Примерно в это же время им были проведены исследования, позволившие сопоставлять индуцируемым действием пучка изменениям в биоморфологии (учитывая, применимость ультрафиолетовых пучков в ультрамикроскопии коллоидных частиц или органелл цитоплазмы [6,7], в том числе в ультраморфологии) функциональные или физиологические изменения, что придало микропучковым методам возможность внедрения в морфофизиологические или функционально-морфологические исследования на необычайно тонком по тем временам уровне.

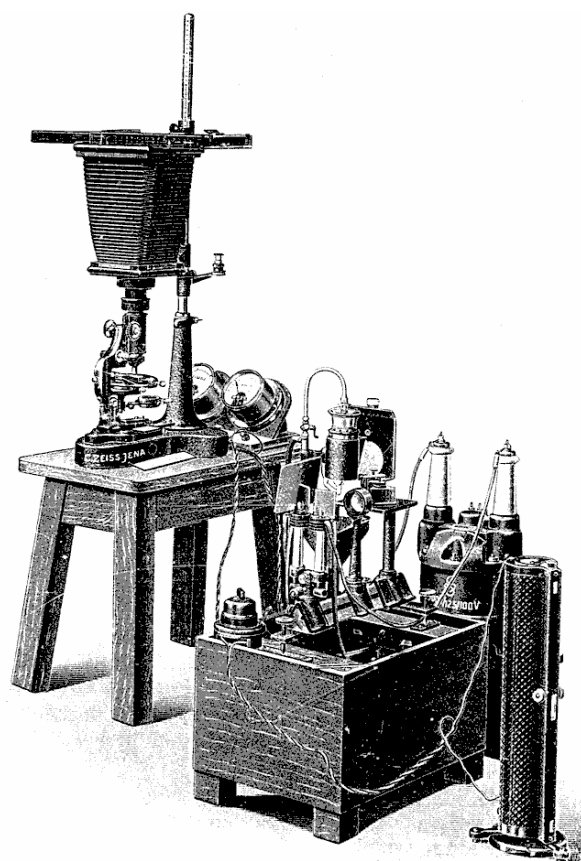
К этим работам можно, в частности, отнести: подавление (супрессию) сердечной деятельности ультрафиолетовым пучком у дафнии [15] (можно только удивляться экспериментальному мастерству Чахотина, так как в настоящее время данная задача считается фактически неразрешимой без использования фотоэлектрических или более точных интерферометрических приборов с автодинным детектированием [16]), воздействие на мионемы - аналоги миофибрилл, имеющие, также как и первые, гладкое или поперечно-

¹ Впрочем, в одной из своих статей (в Compt. Rend. Soc. Biol. за 1920 г.) он дает название "радиопунктурная микроскопия" (radiopuncturemicroscopie), подразумевая, видимо, синхронность воздействия УФ излучения и микроскопического наблюдения за изменениями в клетке в ультрафиолетовом пучке. Не следует путать Чахотинскую "радиопунктуру" с распространенными в тот период методами радиевой радиопунктуры.

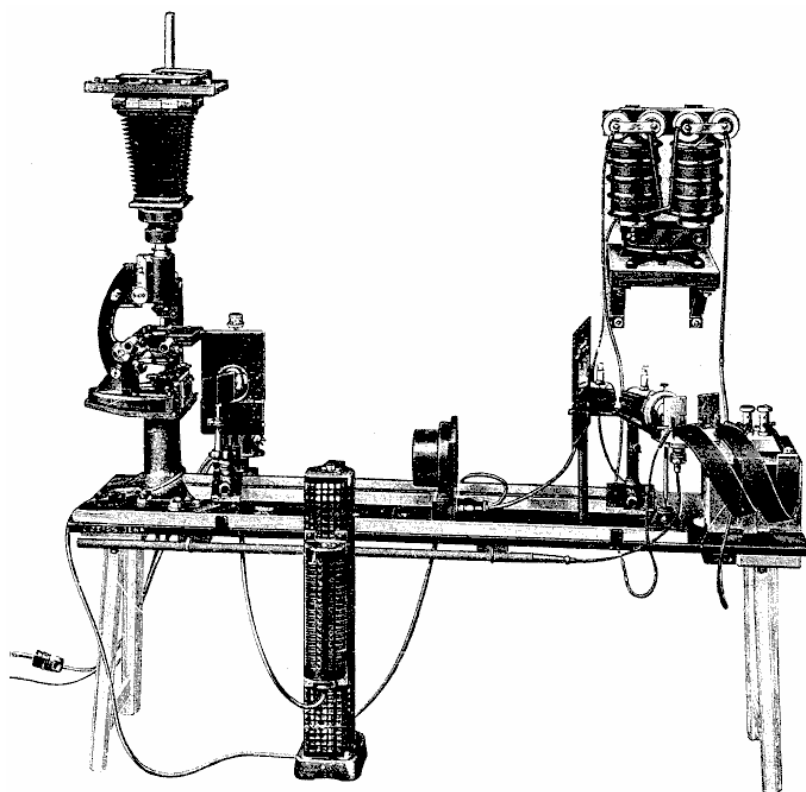
исчерченное нитевидное строение, на субклеточном уровне у *Campanularia* [17] микропучком, и различные приводившие к наблюдаемым физиологическим эффектам микрооперации на простейших с его использованием [18]. Также производились микроманипуляции с отдельными клеточными популяциями [19]. Конструкции использовавшихся Чахотиным в экспериментах (до середины 1930 гг.) установок ранних конструкций приведены на рис. 1.

Длительное время работая в лаборатории Вильгельма Рентгена, Чахотин сумел воспринять методологию физической интерпретации результатов экспериментов, вследствие чего физиолого-морфологические результаты получали всегда веское физико-химическое и биофизическое обоснование. Тем самым он, в определенном смысле, уже в первой трети XX века опередил мировые тренды на несколько десятилетий, поскольку биофизическая морфология как отрасль исследования сформировалась только в последней его четверти (что за рубежом часто связывают с появлением в 1970-е трехтомника "Techniques of Biochemical and Biophysical Morphology" под общей редакцией Глика и Розенбаума). Основываясь на принципах физического редукционизма при анализе биологических явлений, реакцию цитоплазмы на ультрафиолетовое облучение в своих экспериментах он связал с рН и мембранной проницаемостью [20], а гидростатическую реакцию клетки описал в терминах нарушения баланса между цитоплазмой и вакуолярной системой (вакуомом) клетки [21].

Развитие метода. Впоследствии чахотинская техника распространялась в различных областях биологии и получила многопрофильную целевую и методическую дифференциацию. В 1962 г. была разработана сканирующая телевизионная система на основе ультрафиолетового микропучка [22], что привело к возможности электронной обработки и записи фиксируемой морфологической информации. Позже переход с радиоламповой на полупроводниковую элементную базу (в 1970-е гг.) привел к упрощению и удешевлению построения подобных установок [23], что дало импульс к их повсеместному внедрению.



а



б

Рис. 1. Экспериментальная установка С. Чахотина, предназначенная для микрооблучения клеток: а - ранняя версия, б - поздняя версия.

Пока метод был мезоскопическим по масштабам воздействия и детектирования пучка, исследовались, преимущественно, тканевые и гистохимические эффекты воздействия. В частности, в 1960-е гг. были распространены эксперименты по воздействию микропучка на мышцы [24] и культуры тканей [25]. По той же причине продолжались мезоскопические эксперименты на относительно крупных *Ciliata* - *Euplotes*, в частности - исследование влияния ультрафиолетового пучка на морфогенез клеток [26]. Однако, уже начиная с конца 1950-х гг., возник и все более усиливался акцент микропучковых приложений в цитогенетической, кариоморфологической и митотической отраслях, а также в связанной с ними экспериментальной морфологии. В 1958 году было изучено воздействие ядрышек (нуклеолей) на ход митоза и их роль в нем с помощью УФ-микропучка [27]; в 1960-е гг. эти работы были продолжены и верифицированы другой группой исследователей [28], которая позже переключилась на не относящиеся к генетике мембранологические задачи [29]. Изучение воздействия ультрафиолетового микропучка на ядрышки продолжалось и в 1970-е, и в 1980-е гг. [30, 31].

С 1960-х гг. проводились исследования по воздействию микропучком на веретено деления, но если в начальных работах аддитивные физические подходы к анализу позволяли только говорить об оптических изменениях, в частности - о снижении двулучепреломления веретена деления [32], то впоследствии работы в этой области приобретали все более углубленный характер. В 1970-м году наблюдались цитоморфологические эффекты, интерпретировавшиеся как ложные анафазы и задержки истинных анафаз, дезорганизация и деструкция веретена деления [33]. Затем - в 1980-е - в ультрафиолетовом пучке наблюдали удлинение веретена деления [34]. После освоения методов работы с одиночными микротрубочками *in vitro* регистрировали асимметричное поведение и деструкцию микротрубочек под УФ-микропучком [35] и изучали спектр действия пучка для этого случая [36], а чуть позже - оценивали силы, продуцируемые при митотической динамике веретена [37]. Часть групп и в 1970-е-1980-е гг. продолжала работать на

простейших одноклеточных организмах [34,38,39], но все большее количество фокусировалось на гистологических подопытных объектах (срезах тканей, культурах, лоскутах в изолированных камерах и т.д.), но, тем не менее, это было уже связано не с аддитивным воздействием на эти объекты, а с техникой, которая давала возможность работать даже на относительно мелких клетках.

Учитывая то, что в конце 1980-х стали распространены конструктивно доступные УФ-микроручковые (почти DIY) установки на базе стандартных комплектующих [22], а внедрение множества моделей относительно недорогих ультрафиолетовых лазеров с различными длинами волн (азотные, гелий-кадмиевые и пр. - что позволяет производить на одной и той же установки опыты по фотодегенерации хроматина или иной структуры и по фотореактивации генетического материала [40] в рамках единого эксперимента на статическом образце) сделало возможной работу в узко ограниченном пучке с высокой когерентностью (хотя первые лазерные ультрафиолетовые микроручки в микроскопической практике появились ещё в 1970-е [41]) и субклеточную ультрафиолетовую микрохирургию по С. Чахотину, не следует удивляться стремительному развитию этого метода в 1990-е. Следует, однако, отметить, что при массовом переходе на лазерную технологию, не было прекращено и использование некогерентной ультрафиолетовой техники - в 1991 году еще публикуются материалы по техническому обеспечению ламповых микроручковых работ при использовании монохроматоров и фильтров, позволяющих достигать различного биологического эффекта в случае различных оптических параметров пучка [42], так как возможности перестройки по длинам волн у ламповых источников микроручка с применением окон-монохроматоров намного больше, чем у лазеров.

Экспериментально-биологические приложения УФ-микроручковой техники. Следует вкратце охарактеризовать тренды исследовательских работ 1990-х, являющиеся следствием появления вышеуказанных ультрафиолетовых лазеров и специализированных систем на их основе.

Во-первых, были продолжены работы по воздействию микропучком на микротрубочки и генетический материал.

В частности, группой советского ученого Узбекова был изучен процесс постмитотической реконструкции ядрышек в культуре клеток при centrosомной микропучковой фотоинактивации [43] и рассмотрен centrosомный дефект в митозе, индуцированный микропучком [44] - как частный случай дисфункции митотического аппарата при ультрафиолетовом микрооблучении поля веретена деления [45]. Такие же исследования ведутся и за пределами бывшего СССР - например, группа Форера работает на эпителиальных клетках и сперматоцитах, сосредотачиваясь, преимущественно, на воздействии на кинетохор как белковую структуру крепления волокон веретена деления на хромосоме в митозе [46,47,48,49].

Эти работы продолжают цитогенетическую линию работ в области УФ-микропучкового метода, в которой советские исследователи проявили себя весьма позитивно в 1970-е годы [50], но, в то же время, развивают методы интерфазного контроля с использованием ультрафиолетового микропучка, развитие которых было положено еще в 1960-е классическими работами группы Аменты по воздействию на гранулярные и агранулярные клетки тритона *Triturus viridescens* [51,52]. Они отстоят в стороне от чисто генетического или, точнее, молекулярно-генетического тренда в развитии метода, представленного, преимущественно, иммунологическими и вирусологическими работами [53], но они ближе к экспериментальной морфологии или, точнее, ультраморфологии. Возможность обнаружения облученных сайтов при окрашивании их и клеток в целом уранилацетатом позволяет картировать участки и компартменты клетки по их чувствительности или резистентности - этот подход часто встречается в работах 1990-х гг. [54].

В настоящее время ультрафиолетовое микропучковое воздействие в рамках экспериментально-методологической парадигмы Чахотина является современным высокотехнологичным экспериментальным методическим подходом, основанным, преимущественно, на эффективно фокусируемых

лазерных системах. Оно, совместимо с: методами зондовой и атомно-силовой микроскопии [55], лабораториями на чипе [56], лазерными пинцетами и манипуляторами [57], системами синхронного химического и морфологического контроля свободно-радикальных процессов [58], иммунофлуоресцентными методами и инструментами для радиобиологических / фотобиологических сравнительных экспериментов [59].

Интенсивно расширяются возможности применения микропучков для экспериментально-морфологических целей, но если в 1970-е-1980-е гг. эти воздействия были макроскопическими или мезоскопическими, то есть достигали своего результата посредством прямого воздействия на подопытный организм или его эмбрион [60-62], то сейчас это достигается генетическими переключениями или изменениями режимов функционирования мембранных каналов.

Так, в нейроморфологии, где в 1980-е гг. уже применялись ультрафиолетовые микропучки для управления и ингибирования дифференциации тканей и клеточных ансамблей [63], внедряется направление оптогенетики, в основе которого лежит возбуждение встраиваемых в мембрану фотовозбудимых каналов (например - опсинов), для экспрессии которых используются методы генетической инженерии, а возбуждение каналов осуществляется затем оптическим путем. Известны методы импульсного ультрафиолетового облучения в ближнем (UV-A) диапазоне для целей оптогенетики [64,65] и в предшествовавших ей отраслях науки [66]. Подробнее с информацией по последнему пункту можно ознакомиться, основываясь на библиографии обзорной статьи [67]². Этот новый генетический инструмент категорически и качественно отличается от индуцированного лазерным УФ-микропучком введения ДНК в растительные клетки, распространенного в 1980-е годы [68] и хромосомных или "кариогенетических" экспериментальных возможностей, достигавшихся с использованием УФ-микропучков в те же годы при работе с животными клетками [69].

² См. также: Alleman R. Optogenetics: controlling cells with light.[Endocrine Abstracts (2012) 28 MTE8].

Аналоги гальванометрических сканеров для позиционирования и фокусирования ультрафиолетового микропучка. В свете вышеописанных возможностей казалось бы весьма естественным, что метод ультрафиолетового микропучкового воздействия должен быть внедрен во все отрасли, где его применение является биофизически-целесообразным. Если же этого, несмотря на доступность ультрафиолетовых источников, ламп, не происходит, то следует объяснить причины, почему это не так, а искать эти причины следует в других частях материально-технической базы установки.

В настоящее время препятствием для повсеместного внедрения метода ультрафиолетового микропучка во всем его разнообразии и во всех нуждающихся в нем цитологических, гистологических, эмбриологических и экспериментально-морфологических лабораториях можно считать дороговизну и штучный характер устройств точного позиционирования пучка. Современная микропучковая установка - это не только и не столько оптика, сколько точная микромеханика и компьютеризованные системы адаптивного управления пучком на микронном или субмикронном уровне, причем - на высоких скоростях. В современной зарубежной экспериментальной биологии для этих целей используют гальванометрические зеркала или гальванометрические сканеры [70-72], что терминологически эквивалентно.

Эти устройства достигают скоростей сканирования до килогерц и позволяют оперировать микрургически тонкие структуры вплоть до осуществления лазерной трансфекции [73,74] или так называемого лазерного клонирования [75] посредством слияния мембран [76].

Принцип действия гальванометрического сканера состоит в том, что в ответ на подающийся электрический сигнал, форма которого задается компьютерным путем, зеркальная головка вращается по двум направлениям и меняет угол подачи пучка на микропрепарат. Чем выше частота сигнала тем лучше скорость сканирования, однако при этом существует вполне очевидная зависимость цены гальванометрического отражателя от частоты сканирования, вследствие чего в развивающихся странах или странах с секвестром финансирования

науки, "по умолчанию", используются худшие частотные параметры сканирования. Для многих цитофизиологов данное обстоятельство является непреодолимым ограничением на пути к экспериментам с ультрафиолетовым микропучком. Между тем, в исследовательской практике широко известны шлейфовые / светолучевые осциллографы с подвижными гальванометрами, которые, будучи встроенными в фиксирующую кассету (рис. 2), по существу, представляют собой те же самые гальванометрические сканеры, только откликающиеся не на сигнал ЭВМ, подаваемый через специальный контроллер, а на любой сигнал, подаваемый на аналоговый вход светолучевого осциллографа. Если в качестве управляющей их движением "программы" использовать последовательности сигналов / импульсов, транслируемые с цифро-аналогового преобразователя и формирующие необходимые траектории светового пучка, то можно будет использовать блоки гальванометров устаревших светолучевых осциллографов для сканирования поверхности микропрепарата / культуры тканей ультрафиолетовым пучком, формируемым встроенной в корпус осциллографа ртутной УФ-лампой (см. ниже).



Рис. 2: Вычлененный блок зеркальных гальванометров светолучевого осциллографа, который может использоваться для Y-сканирования.

Светолучевые осциллографы в экспериментальной биологии. Надо сказать, что использование светолучевых или же шлейфовых осциллографов в биомедицинской практике и разработка специализированной измерительной техники для прикладных медицинских задач на их основе получили мощный импульс к развитию ещё в начале XX века в результате усовершенствования ламповой техники и интенсифицировались к 1930-м гг. Наиболее многостороннее развитие данный подход получил в Германии, где уже в 1930 г. исследования токов действия нервов ("nervenaktionsströme") производились посредством шлейфовых ("schleifenoszillograph") осциллографов [77], в 1931 г. ламповая техника и шлейфовая запись были использованы в физиологической акустике [78] и в акустическом анализе дыхания [79], в 1932 г. была впервые осуществлена фотоэлектрическая запись тонов сердца с использованием светолучевой осциллографии на фотографической бумаге [80], в 1935 г. шлейфовый осциллограф впервые был применен при изучении акустической стимуляции вестибулярного аппарата [81], а в 1938 г. он же был использован в ходе регистрации колебаний вибрирующих голосовых связок гортани препаратов в установке на основе чувствительного фотоэлемента [82]. В том же году выходит статья Рихтера о преимуществах осциллографических устройств на базе трубок Брауна перед другими способами регистрации биоэлектрических потенциалов [83], которая вызывает позитивные дискуссии в медицинской среде, после чего (*post hoc non est propter hoc*) уже в 1939 году появляется первая работа по поиску ошибок при измерениях электрофизиологической активности мозга, в которой указывается, что светолучевые осциллографы несвободны, в силу физических принципов регистрации, от ошибок при записи электрофизиологического сигнала [84].

Пристальный библиографический анализ хронологически убеждает в том, что первые зарубежные источники информации о возможных ошибках светолучевой записи и шлейфовых осциллографов в электрофизиологии и нейрофизиологии появились более чем на 30 лет ранее первых полноценных работ советских авторов по анализу этих ошибок для общего случая [85-87].

Однако на первую половину XX века шлейфовые осциллографы оставались весьма прецизионными анализаторами электрофизиологической активности, вследствие чего еще долгое время продолжалось их активное использование в зарубежной электрофизиологии, причем, как минимум, до конца второй мировой войны Германия лидировала по валовому количеству статей, выполнявшихся с их использованием. В 1940 г. с помощью шлейфовой осциллографической техники там регистрировалась электрофизиологическая активность на мышечной ткани [88], после чего, не считая ряда незначительных статей с упоминанием данного типа осциллографов, до второй половины 1940-х происходит явное торможение исследований с использованием соответствующих методик и резкий спад их публикации в журналах на немецком языке. Только в 1948 г. появляется первая крупная послевоенная работа с использованием шлейфовых осциллографов для регистрации искусственного нистагма [89]; еще несколько разнородных работ, связанных с биомеханической динамометрией [90], созданием электроскриптографа для нужд психофизиологии на основе шлейфового осциллографа [91], установлением эффективного давления во внутригрудной циркуляции [92] и наблюдением тетануса при повреждении сердца лягушки [93] при использовании шлейфового осциллографа, появляются в 1950-е. Затем шлейфовые осциллографы в том виде, в каком они существовали с 1910-х гг., практически перестают встречаться в лабораторной практике и заменяются новыми - светолучевыми осциллографами.

Необходимо отметить, что понятие "светолучевой осциллограф" ("lichtstrahloszillograph") в немецкоязычной литературе появилось в обзоре зарубежных журналов не ранее 1952 г. [94], а в общедоступной лабораторной справочной литературе зафиксировано приоритетно в справочниках "Registrierinstrumente" за 1959 г. и "Meßzeuge und Meßanordnungen" за 1965 г., поэтому неудивительно, что в медицинской и биологической практике оно появилось в публикациях только в начале 1970-х гг. Исходно светолучевые осциллографы в ФРГ были внедрены в гистохимии в спектроскопии быстро

затухающих процессов флуоресценции [95] (это, по всей видимости, был первый в биомедицинской химии случай использования светолучевых осциллографов после ссылки 1931 г. на приложение шлейфового осциллографа в работе по исследованию щелочного резерва крови [96]), но затем множество работ в биомеханике [97,98], биоакустике и отоларингологии [99] также были связаны с их использованием, что закрепило эту традицию употребления на практике.

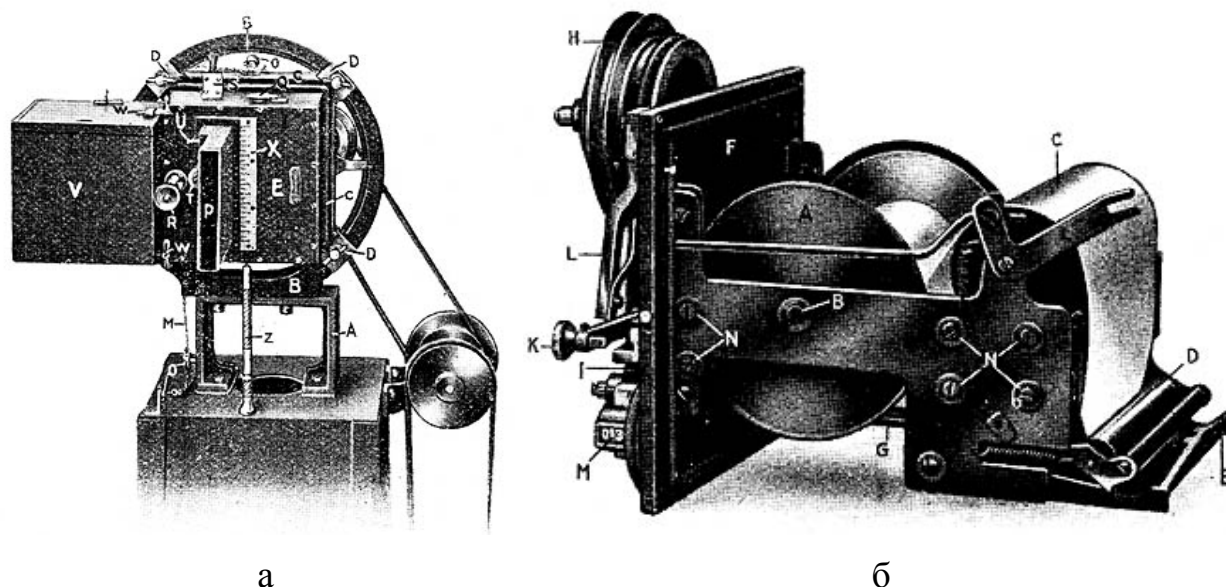


Рис. 3: Типичный фото-кимограф (Photo-Kymograph) первой половины XX века: конструкция проф. Бремстера (Photo-Kymographion nach Prof. Broemser), приводится по изданию Jaquet J. "Jaquet Apparatus: Catalogue" No. 503: а - стр. 51, фиг. 1022; б - стр. 0052, фиг. 1022а.

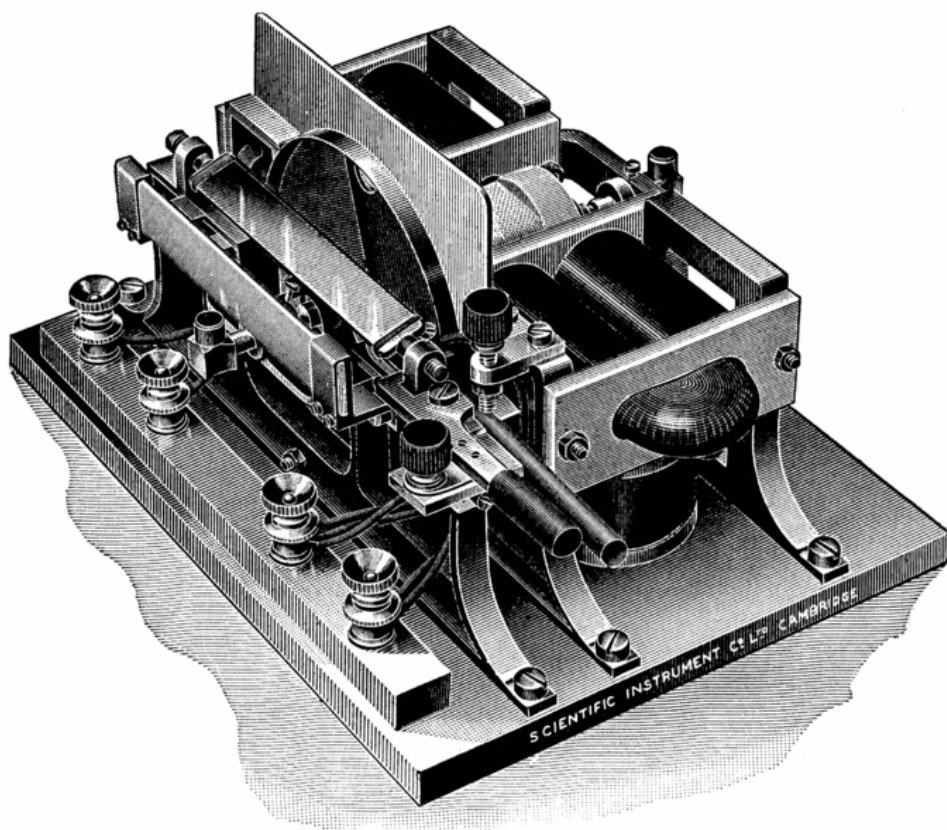
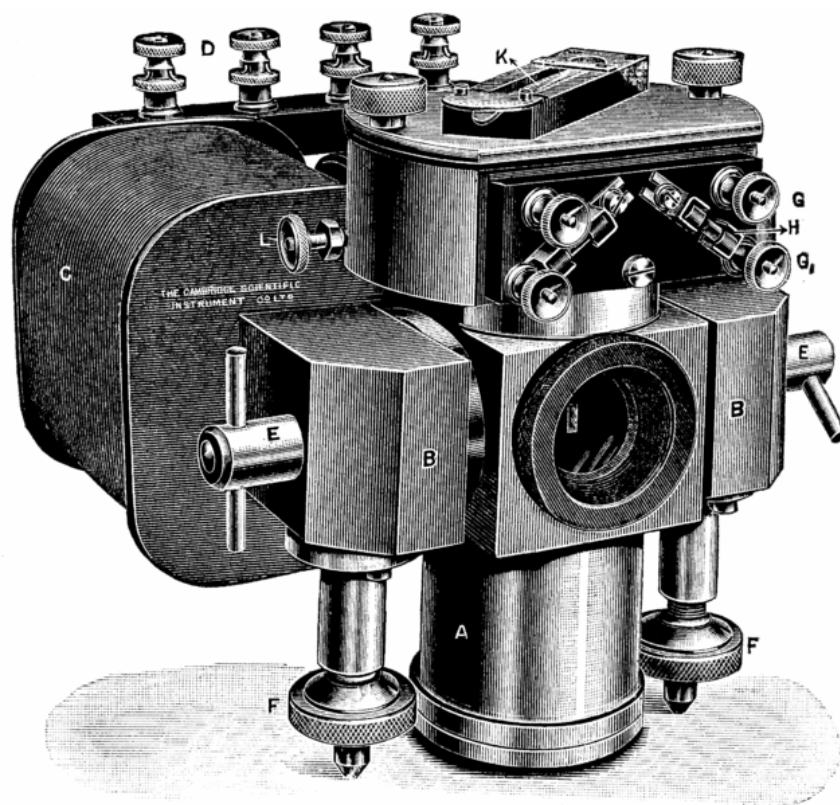
Распространенность светолучевых осциллографов в биологии в СССР.

Одним из наиболее "биологических" аппаратов, строившейся на светолучевой принципиально-технической базе были фото-кимографы (photo-kymograph), примеры которых даны на рис. 3. Фото-кимографы были весьма популярны в советской исследовательской практике во время своего актуального использования (в 1950-х - 1960-х гг.), о чем говорит шквал экспериментальных статей с использованием фото-кимографии в одном только "Бюллетене

экспериментальной биологии и медицины" за этот период (см напр. [100-106]). В 1963 году в СССР была разработана фотографическая приставка к катодно-лучевым осциллографам (правильнее - осциллоскопам), позволившая регистрировать визуализируемые сигналы эквивалентно обычному фотокимографу [107], что, однако, не снизило популярности фотокимографического метода. За рубежом использование фото-кимографов во многих местах продолжалось до 1970-х гг. [108] и позднее, хотя первые работы в областях биомедицины на принципиально-подобном оборудовании публиковались ещё в 1940-х [109], а оптический осциллограф - как очевидный предшественник фотокимографа был рожден в 1920-е.

В СССР оптические светолучевые осциллографы, использовавшиеся как аналоги фото-кимографов, также использовались и совершенствовались до конца 1970-х гг. [110,111], но одновременно завозились функционально аналогичные немецкие аппараты RFT [112,113] и продолжали использоваться аппараты американской довоенной конструкции, известные также как "Duddell" или "moving-coil oscillograph" [114], фрагменты конструкции и оптики которого приведены на рис. 4. В связи с этим, многочисленные переработки конструкции последнего в Советском Союзе можно связать с отсутствием достаточного аппаратного многообразия, позволившего бы работать на специализированной для каждого направления измерений или экспериментальной физиологической практики технике.

Настоящую работу, вероятно, также можно отнести к этому тренду, так как, субституируя функционал гальванометрических сканеров, лежащих в основе работы светолучевых осциллографов, приходится также исходить из базовых принципов приборостроения, а не из целевого оптимума конструкции. Надо отметить, что ни одна из проведенных реконструкций не должна приводить к выходу за рамки ГОСТ 9829-81 по термостатированию, временам установки рабочего режима, и диапазону длины луча от зеркала гальванометра до регистратора, так как оптимальные электромеханические и метрологические параметры шлейфовых осциллографов тождественны.



Илл. 4: Электромагнитный осциллограф ("Duddell moving-coil oscillograph"), 1917. Фрагменты конструкции. Приводится по 2-му изданию: "Hawkins Electrical Guide", Vol. 6, Chapter 63: Wave Form Measurement.

Зеркальные гальванометры - основа светолучевых осциллографов и прототип гальванометрических сканеров Чахотинских установок. В связи с последним тезисом может быть целесообразным указание на ещё один упрощенный метод управляемого сканирования, отчасти апробированный нами на практике. Этот метод рационален, в частности, для организаций, в которых светолучевых осциллографов, увы, не имеются, но существуют конструктивно более ранние зеркальные гальванометры, отдельные от светолучевых осциллографов. Хотя общеизвестно, что первый зеркальный гальванометр изобретен в 1826 году Иоганном Христианом Поггендорфом, эта чрезвычайно простая физически конструкция использовалась как отдельный инструмент до последней четверти XX века. Поэтому проблем с нахождением исходных приборов для их модернизации, как правило, не возникает.

В странах Восточной Европы гальванометры с фотоэлектрической обратной связью появились в конце 40-х [115]. Принципы фотоэлектрического усиления отклонения были до того описаны многими авторами из Европы, но в более новых восточно-европейских приборах они были расширены в аспекте демпфирования и периода колебаний путем обратной подачи токов, пропорциональных первой и второй производной отклонения, за счет чего чувствительность приборов была увеличена в 20 раз. Чувствительные приборы того времени имели метрологический оптимум в низкочастотном диапазоне [116], но в 1970-х были созданы осциллографические гальванометры для измерения быстропротекающих процессов [117].

Наиболее активно шла работа в этом направлении в Советском Союзе, где для обеспечения качества измерений с использованием таких гальванометров были проведены крупномасштабные ОКР, нацеленные на:

1. снижение флуктуативной дисперсии [118];
2. обеспечение возможности работы с низкоамплитудными "слабыми" сигналами [119] в диапазоне до 10 Гц;
3. оптимизацию частотной характеристики [120];

4. создание бесконтактного фотоусилителя с линейной характеристикой для потенциометра с высоким коэффициентом усиления по напряжению [121];

5. разработку качественных методик измерения и контроля параметров зеркальных гальванометров [122, 123].

Возможность модулей светолучевых осциллографов и их зеркальных гальванометров для построения Чахотинских экспериментальных систем.

В наиболее релевантном советском монографическом источнике по светолучевым осциллографам, изданном в 1982 году [124], отмечается, что "образцы многоканальных осциллографов с ультрафиолетовой регистрацией, в которых использовались типовые схемы и узлы, включая оптическую систему и блоки гальванометров, были разработаны практически одновременно и независимо в СССР и США, около 20 лет тому назад" (т.е. - в начале 1960-х).

Однако при этом не учитывается тот факт, что на момент написания этих строк в США и Европе уже инициировался массивный переход на новые осциллографические средства регистрации, завершившийся, в итоге, переходом на цифровую регистрацию, а советские специалисты доводили до совершенства морально устаревающие, с точки зрения западных релевантных источников, конструкции.

Примеры результатов такого совершенствования технологии и дизайна 1980-х гг. приведены на рис. 5, 6. В реальности существует возможность построения хорошо экранированных чахотинских установок на их основе в исходных корпусах при встраивании оптической схемы на основе оптической схемы светолучевого тракта осциллографа.

Поэтому не будет преувеличением предположить, что фактически все конструкции советских зеркальных гальванометров, предназначенные для тонких измерений, после 1970-х гг. настолько оптимизированы, что пригодны для модификации под нужды прецизионного эксперимента по микропучковому облучению (однако, так как, в отличие от большинства светолучевых осциллографов, они не имеют в своей конструкции ультрафиолетового источника, это приложение не может быть осуществлено без его внедрения).

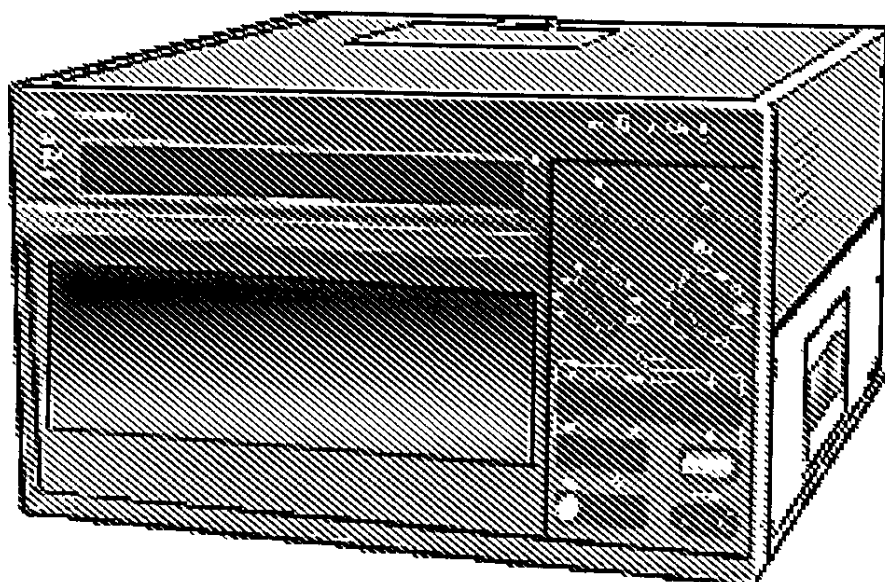


Рис. 5: Советский светолучевой осциллограф Н071.4М

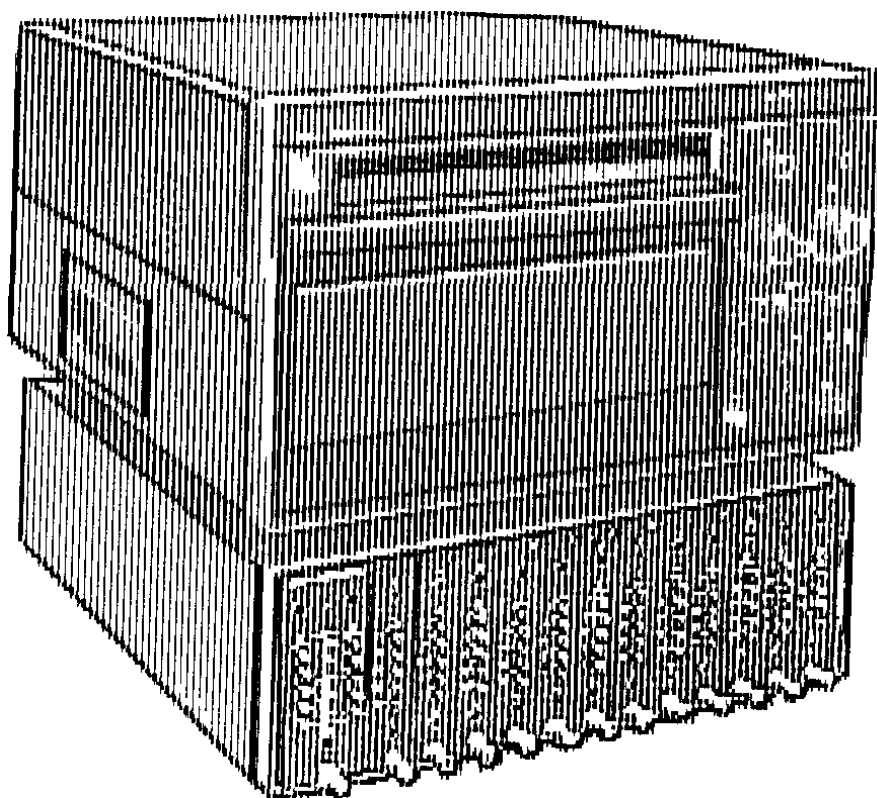


Рис. 6: Экспериментальный светолучевой осциллограф типа К008 - комплект аппаратуры на основе Н071.4М.

Уровень техники (DIY). Использование оптимально отъюстированных гальванометрических зеркальных устройств или зеркальных гальванометров, управляемых сигналом от виртуального или физического генератора сигналов специальной формы, не является (в настоящее время) анахронизмом. Напротив,

по мере развития морфологических методик на микроуровне, в частности - оптической когерентной томографии [125], возникает потребность в подборе качественно-оптимальных сканирующих функций (пилообразной, треугольной, синусоидальной, меандровой и т.п.), оптимизации АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) и ФЧХ (фазо-частотной характеристики) [125].

С конца 1990-х годов существуют методы когерентного картирования и имэджинга, использование гальванометрических сканеров в которых является неизбежным [126] (например, при *in vivo* сканировании в офтальмологии и в ходе ретинальной биометрии). Это необходимо также и при сканировании флуоресцирующих капиллярных массивов с биохимическими аналитами или мечеными клетками [127], и при картировании в ультразвуковом диапазоне [128], и при изысканиях в терагерцовой области спектра [129]. Несколько альтернативные подходы разработаны для задач конфокальной флуоресцентной микроэндоскопии [130] (т.н. гиподермальные иглы - зонды), но до последнего времени мультифотонная конфокальная микроскопия и микроманипуляции на её основе (лазерная микрохирургия, оптический траппинг, локализованный фотолиз и фотовыжигание компартментов и ультраструктурных сетей) также требовали использования гальванометрических сканеров [131]. Еще в 1970-е гг. было известны три основных типа оптических "пучковых дефлекторов", таких как акустооптические, аналоговые электрооптические и (наиболее классические по конструктивной реализации) гальванометрические [132], однако в настоящее время при биологических приложениях чаще приходится сталкиваться именно с последними - управляемыми гальванометрическими отражателями. Благодаря их приспособленности к вращательным движениям при сканировании [133], можно констатировать, что их использование не ограничивается трехмерными морфологическими сканами, но также может быть использовано в опытах для пространственно-временной развертки событий или снятия цейттрафферных последовательностей на локальных секторах вращения. Не следует удивляться тому, что гальванометрические зеркала используются и для манипуляции одиночными клетками и их микроструктурой при точном позиционировании в

установках типа оптических пинцетов [134], и при экспериментальных измерениях вызванных потенциалов [135]. Универсальный характер данного инструмента технологически следует из универсализма самого зеркального гальванометра. Поэтому восстановление и перепрофилирование устаревших прецизионных зеркальных гальванометров и прямое их подключение к системам генерации сканирующей развертки способно ввести в эксплуатацию малобюджетных лабораторий инструмент современного уровня, не прибегая к высоко затратным элементам сборки современной конструкции.

Математическое обоснование DIY-подхода. Для перепрофилирования зеркально-гальванометрических узлов осциллографов в элементы оптического тракта микропучковых установок необходимо экстраполировать формальные модели динамики зеркальных гальванометров на целевую модель изменяемой конструкции. При рассмотрении подлежащей модификации отечественной техники мы опирались на монографии по светолучевым осциллографам [137, 138], оптическим приборам для записи колебаний и магнитоэлектрическим осциллографам [139-141], хорошо известные специалистам по регистрации на оптических принципах. Расчеты производились в соответствии с формальным аппаратом, воспроизводимом с необходимыми изменениями по работе [137] и смежным статьям [141-144].

Общеизвестно, что источниками света в светолучевых осциллографах служат лампы сверхвысокого давления (давления ртутных паров до 5-6 МПа), излучение которых сосредоточено на коротковолновом спектральном отрезке в ультрафиолетовом диапазоне. Для светолучевых осциллографов производства США и Западной Европы с конца 1970-х гг. также характерно использование ксеноновых ламп, но их использование недостаточно эффективно в методиках микропучкового воздействия в силу другого спектрального состава излучения. Поскольку в холодной лампе давление паров ртути не превышает 1000 Па, нестабильность разряда в первые минуты не позволяет говорить о спектральной добротности излучателя; с ростом давления до 15-30 МПа уже происходит увеличение количества непрерывного излучения и относительное уменьшение

амплитуды отдельных линий. Поэтому об оптимальности режима воздействия, с точки зрения стандартизации метрологических характеристик, рационально говорить только в малом диапазоне характеристик, который и использовался нами в ходе микроманипуляций. Оптимальность вычислима, исходя из яркости светящегося тела источника, формирующей облученность (освещенность УФ) зоны воздействия.

Освещенность пропорциональна яркости светящегося тела источника B , коэффициенту пропускания оптического тракта \mathbb{k} и зависит от параметров оптической системы:

$$E = \mathbb{k}B \frac{\hbar \lambda}{2\mathfrak{M}}$$

В числителе формулы множителями являются высота \hbar цилиндрического объектива и ширина λ зеркала гальванометра, а в знаменателе - расстояние между зеркалом гальванометра и объектом облучения \mathfrak{A} и расстояние между вершиной первой поверхности линзы объектива и облучаемым объектом \mathfrak{M} .

Высота \hbar может быть вычислена по формуле

$$\hbar = \Upsilon \left[\mathfrak{M} - \delta \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \right],$$

где

η - показатель преломления стекла,

δ - толщина линзы,

причем Υ такова, что $\hbar \approx \frac{1}{2} \mathfrak{M}$.

Коэффициент пропускания \mathbb{k} учитывает потери в стекле линз, при отражении от зеркал и преломляющих поверхностей, а также потери в демпфирующей жидкости гальванометра (если таковая заполняет корпус). В зависимости от \mathbb{k} освещенность объекта исследования, создаваемая ртутной лампой яркостью 1000 Мкд/м^2 , варьируется в пределах $2-8 \cdot 10^5$ люкс.

Зная расстояние между зеркалом гальванометра и объектом облучения \mathfrak{A} и расстояние между вершиной первой поверхности линзы объектива и облучаемым объектом \mathfrak{M} , можно вычислить фокусное расстояние \mathbb{F} и радиус цилиндрической поверхности \mathfrak{R} вычисляются по формулам

$$\mathbb{F} = \frac{(\mathfrak{A} - \mathfrak{M}) \left[\mathfrak{M} - \delta \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \right]}{\mathfrak{A} - \delta \left(1 - \frac{1}{\eta} \right)}$$

причем

$$\mathfrak{R} = \mathbb{F}(\eta - 1)$$

Используя фильтры, можно отсекают различные линии и, тем самым, регулировать воздействие света на клетку в Чахотинской микроскопии и микрургии (если это позволяет зеркало гальванометра). Обычно учитывают две линии в диапазоне С (184.949 нм и 253.651 нм), одну линию в диапазоне А (365.015 нм) и одну в близкой к ультрафиолету области (404.656 нм) видимого диапазона. Данного набора, обычно хватает для простых фотобиологических операций. В установившемся режиме светящееся тело имеет форму шара с яркостью в центральной зоне 1500 Мкд/м^2 , а освещенность сфокусированного пятна, создаваемого телом, приближается к миллиону люкс. Сфокусированное на объекте интереса световое пятно имеет ширину $\odot = \gamma G$, где γ - ширина светящегося тела, характеризующая его, наряду с \mathbb{Q} (см. ниже), а $G = \mathfrak{A}/\Psi$.

Освещенность облучаемого ультрафиолетовым пучком объекта не зависит от высоты зеркала гальванометра \mathfrak{A} , которая определяет длину светового пятна ζ . Величины \mathfrak{A} и ζ связаны соотношением

$$\zeta = \mathfrak{A} \wp$$

где \wp - увеличение цилиндрического объектива, равное

$$\wp = \frac{\mathfrak{M} - \delta \left(1 - \frac{1}{\eta} \right)}{\mathfrak{A} - \mathfrak{M}}$$

Диаметр линзы гальванометра \mathcal{D} , фокусное расстояние Θ и радиус кривизны ρ связаны так, что

$$\mathcal{D} \geq \frac{2\Xi\mathfrak{Z}}{\mathfrak{A}} + b$$

где Ξ - расстояние между линзой и зеркалом гальванометра, \mathfrak{Z} - максимальная амплитуда перемещения светового пятна. При этом

$$\Theta = 2 \frac{(\mathfrak{A} - \Xi)(\Psi - \Xi)}{\mathfrak{A} + \Psi - 2\Xi} ,$$

где Ψ - расстояние от источника света до гальванометра, приближенно равное величине светового рычага (ср., напр., по: ГОСТ 9829-81).

Световой поток каналов облучения формируется цилиндрической линзой конденсора и диафрагмой, зеркалом и линзой гальванометра, регулируемой диафрагмой и цилиндрическим объективом. Оптическая система может также включать в себя ряд дополнительных элементов, например - промежуточные зеркала между ртутным источником и гальванометром и т.д., но в простейшем случае ими можно пренебречь.

При расчете характеристик конденсора заданными величинами в осветителе со ртутной лампой является диаметр светящегося тела \mathcal{Q} , расстояние от источника света до гальванометров Ψ , ширина световой полосы ξ и длина магнитного блока Λ .

Так как увеличение конденсора $\aleph = \xi / \mathcal{Q}$, расстояние от светящегося тела до линзы конденсора f рассчитывается по формуле

$$f = \frac{\Psi + \varpi(\aleph + 1) \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)}{\aleph + 1} ,$$

где ϖ - толщина линзы, пренебрегая последней, можно полагать, что

$$f = \frac{\Psi}{\aleph + 1}$$

Фокусное расстояние конденсора тогда равно

$$\Sigma = \frac{(\Psi - f) \left[f - \varpi \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \right]}{\Psi - \varpi \left(1 - \frac{1}{n} \right)}.$$

Фокусирование с использованием конденсора является одним из методов оптимизации потока при воздействии на образец. Другим методом изменения экспозиции является изменение времени облученности точек через скорости движения оптического пятна, определяющие скорости манипуляций.

Управление скоростью. Скорость манипуляций определяется скоростью движения пятна, которая определяется подаваемым сигналом. Известно, что светолучевые осциллографы имели в раннем варианте скорость движения светового пятна порядка сотен метров в секунду, в 1960-х гг. этот параметр дошел до 1000 м/с; в 1970-х - до 2000 м/с. Однако получаемая таким образом характеристика скорости является также следствием учета относительного движения барабана, в то время как собственной динамике гальванометрических головок в частотном диапазоне до 10-15 кГц свойственна скорость до 10 м/с. В связи с этим возможен контроль скорости движения по спектру хода головок.

Собственно, гальванометрическая часть состоит из сменной вставки гальванометра и магнитного блока с постоянным магнитом и деталями магнитопровода. Сменная вставка гальванометра, устанавливаемая в гнездо магнитного блока, представляет собой конструктив, содержащий подвижную рамку с подводящей к ней ток растяжками, зеркало, закрепленное на растяжке, и линзу, вставленную в корпус вставки.

Возможен также механизм петлевого типа, который не содержит общей магнитной системы на все вставки гальванометров, а каждая вставка имеет автономную магнитную систему, представляя собой отдельный измерительный механизм, но для реализации метода Чахотина это не представляет существенных различий. Рама такого измерительного механизма состоит из витка проволоки, расположенной между двумя опорами, причем плоскость витка совпадает с направлением магнитного поля в рабочем зазоре. Под действием электромагнитных сил происходит упругая деформация, причем

изменяется положение плоскости витка, в результате чего зеркало, фиксированное на обеих половинах витка, поворачивается.

Длительность экспонирования, т.е. освещения отдельного участка клетки определяется простейшей формулой

$$t = \frac{s}{\sqrt{v^2 + w^2}}$$

s - линейный размер пятна вдоль вектора суммарной скорости

v - скорость перемещения пятна по оси ординат

w - скорость движения экспонируемого объекта интереса.

При работе на высоких частотах и скоростях аналогово-программируемой микроманипуляции до 15-20 кГц рационально использование высоконадежных петлевых механизмов, чувствительных к напряжению:

$$\frac{X}{Rl} = 1$$

где

X - чувствительность к току,

l - чувствительность к напряжению,

R - внутреннее сопротивление гальванометра.

В альтернативном случае можно предварительно произвести симуляцию работы механизма в случае подачи того или иного сигнала, так как известно дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее движение рамки в рабочем зазоре между полюсами магнитной системы:

$$J = \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + Y\alpha = L(t)$$

где

J - момент инерции подвижной части гальванометра

α - текущий угол поворота рамки с зеркалом

P - коэффициент успокоения

Y - удельный противодействующий момент растяжек,

$L(t)$ - вращающий момент.

Когда угловым сопротивлением можно пренебречь, считается, что поворот рамки воспроизводит функцию вращающего момента:

$$Y\alpha = L$$

Строго говоря, существуют также статистические искажения, так как при повороте рамки на угол в однородном поле между полюсами магнитной цепи гальванометра вращающий момент не остается постоянным, а уменьшается по косинусоидальному закону

$$L_{\alpha} = L \cos \alpha ,$$

однако прицельное рассмотрение механики не входит в компетенцию данной работы, так как авторы надеются на использование штатных отъюстированных узлов промышленных приборов, в которых подобные искажения нивелированы и сведены к минимуму.

Ход пятна. Допустим, что на вход светолучевого осциллографа или модуля гальванометров с цифро-аналогового преобразователя, управляемого программно-эмулируемым генератором с ЭВМ, подается сигнал, управляющий раскачкой гальванометра. Тогда длительность экспозиции будет минимальной в моменты движения пятна с максимальной скоростью Π .

Минимальное время экспонирования равно Θ/Π , а при неподвижности светового пятна время экспозиции отдельного участка будет равно ζ/Π , что позволяет рационально управлять пучком от гальванометра. Если же таких гальванометров много больше единицы, можно создать систему облучения в различных осях и направлениях объекта, используя многоканальные цифро-аналоговые преобразователи.

Характеристика движения пятна в некоем направлении будет определяться амплитудно-частотной характеристикой поступающего на актуатор сигнала. Например, в случае регистрации гармонического процесса:

$$\Pi = 2\pi Z\mu ,$$

где Z - амплитуда колебаний,

μ - частота.

При подаче прямоугольных импульсов

$$P = 2.87Z\mu ,$$

где Z - амплитуда колебаний,

μ - частота.

Исходя из этого, развертка воздействующего пучка может варьироваться программируемым путем - аналоговым сигналом с выхода цифро-аналогового преобразователя. Соответственно, для того, чтобы составить программируемые режимы воздействия на клеточные структуры нужно всего лишь разработать различные последовательности сигналов, приводящие к различным откликам электромеханической части установки. Можно создавать достаточно сложные и многостадийные процессы воздействия, а также проводить многокоординатное воздействие на клетки и ткани, используя многоканальные ЦАП с программной маршрутизацией сигналов с выходов на различные зеркальные гальванометры, расположенные в соответствующих оптических плоскостях движения пучка.

В следующей части настоящей работы описываются новые подходы к инжинирингу гальванометрических сканирующих устройств для простейших Чахотинских УФ-микроручковых ДІУ-микроопераций под широкопольными или бинокулярными микроскопами на подобной основе. Приводится методика спектрального контроля подобных манипуляций.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность проф., д.б.н. Юрию Ивановичу Посудину (Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины - укр. "Національний університет біоресурсів і природокористування") за любезное разрешение, выданное на использование изображений оригинальных установок Чахотина из его книги *Биофизик Сергей Чахотин (1995)*³ [136], а также нашим коллегам из институтов НАНУ и РАН за предоставление документации на зеркальные гальванометры и светолучевые осциллографы 1960-х - 1980-х гг.

³ Недавно эта работа была перевыпущена издательством "Аналитическая микроскопия" (Пущино).

Литература:

1. Tschachotin S. Die mikroskopische Strahlenstichmethode, eine Zelloperationsmethode // Biol. Zentralbl., 1912, Vol. 32, pp. 623-630.
2. Tchakhotine S. Action localisee des ayons ultraviolets sur le nouveau de l'oeuf de l'oursin par radiopuncture microscopique // Compt. Rend. Soc. Biol., 1920, Vol. 83, pp. 1593-1595.
3. Tchakhotine S. Sur le mecanisme de l'action das rayons ultraviolets sur la cellule // Ann. Inst. Past., 1921, Vol. 35, pp. 321-325.
4. Tchakhotine S. L'effet d'arret la fonction de la vacuole pulsatile de la Paramecie par micropuncture ultraviolette // Compt. Rend. Soc. Biol., 1935, Vol. 120, pp. 782-784.
5. Tchakhotine S. La fonction du stigma chez le Flagelle Euglena, etudiee au moyen de la micropuncture ultraviolette // Compt. Rend. Soc. Biol., 1936, Vol. 121, pp. 1162-1165.
6. Tchakhotine S. Flocculation localisee des colloides dans la cellule par la micropuncture ultraviolette // Compt. Rend. Acad. S., 1935, Vol. 200, pp. 2036-2038.
7. Tchakhotine S. Ultramicropuncture ultraviolette, moyen nouveau d'etude de phenomenes colloidaux dans la cellule vivante // Compt. Rend. Acad. S., 1938, Vol. 206, p. 133.
8. Tchakhotine S. Les Protozoaires, objets d'experiences en Cytologie experimentale (Recherches faites avec la micropuncture ultraviolette) // Ann. Protistol., 1936, Vol. 5.
9. Tschachotin S. Recherches de cytologie experimentale: faites avec la methode de la radiopuncture microscopique (Bulletin de l'Institut oceanographique, No. 401), Monaco, 1921, 23 p.
10. Dürken A. Die Wirkung von Ultraviolettbestrahlungen auf die Ohranlage von Triton alpestris // Wilhelm Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen, 1951, Vol. 144, No 4, pp. 521-554.

11. Dürken B. Einführung in die Experimentalzoologie. Springer, Berlin, 1919, 446 p.
12. Tchakhotine S. La partenogenes artificelle de l'oeuf de la Pholade par micropuncture ultraviolette // Compt. Rend. Soc. Biol., 1935, Vol. 119, p. 1394.
13. Tchakhotine S. Parthenogenese experimentale de l'oeuf de la Pholade par micropuncture ultraviolette, aboutissant a une larve vivante // Compt. Rend. Acad. S., 1938, Vol. 106. p. 377
14. Tchakhotine S. Experiences de micropuncture ultraviolette sur les blastomeres de l'oeuf de Pholades (Ph. Candida et Ph. crispata) // Compt. Rend. Soc. Biol., 1938, Vol. 127, p. 200.
15. Tchakhotine S. Suppression de la fonction du coeur de la Daphnie par la micropuncture ultraviolette // Compt. Rend. Soc. Biol., 1935, Vol.119, p. 1392
16. Usanov D.A., Skripal A.V., Varagin A.Y., Skripal A.V., Potapov V.V., Shmakova T.T., Mosiyash S.S. Laser autodyne interferometry of the dynamic parameters of biological specimens // Technical Physics Letters, 1998, Vol. 24, No. 3, pp 183-185.
17. Tchakhotine S. Irradiation localisee du myoneme du pedoncule des Vorticelles par micropuncture ultraviolette // Compt. Rend. Acad. S., 1936, Vol. 202, p. 1114.
18. Tchakhotine S. Recherches physiologiques sur les Protozoaires, faites au myen de la micropuncture ultraviolette // Compt. Rend. Acad. S., 1935, Vol. 200, p. 2217.
19. Tchakhotine S. Reactions "conditionnees" par micropuncture ultraviolette dans le comportement d'une cellule isolee (*Paramecium caudatum*) // Arch. Inst. Prophylactique, 1938, Vol. 10, p.119.
20. Tchakhotine S. Sur les reactions du cytoplasme et du vacuome a la micropuncture ultraviolette chez *Ascoidea rubescens* en fonction du pH du milieu de la permeabilite // Compt. Rend. Soc. Biol., 1936, Vol. 121, p.1525.

21. Tchakhotine S. Sur les variations de l'équilibre entre cytoplasme et vacuome chez *Ascoidea rubescens*, par irradiation au moyen de la micropuncture ultraviolette // *Compt. Rend. Soc. Biol.*, 1956, Vol. 121, p. 952.
22. Stonington O.G., Spurck T.P., Snyder J.A., Pickett-Heaps J.D. UV microbeam irradiations of the mitotic spindle I. The UV-microbeam apparatus. *Protoplasma*, 1989, Vol. 153, Nno. 1-2, pp 62-70.
23. Starling D. A simple ultraviolet microbeam apparatus // *Journal of Microscopy*, 1974, Vol. 100, No 3, pp. 331–336.
24. Stephens R.E. Analysis of Muscle Contraction by Ultraviolet Microbeam Disruption of Sarcomere Structure // *Journ. Cell Biol.*, 1965, Vol. 25, No 2, pp. 129–139.
25. Amenta P.S. Lymphotaxis induced by ultraviolet microbeam irradiation of fibroblasts in tissues cultured from mouse embryos // *Anat. Rec.*, 1967, Vol. 159, No 2, pp. 199–209.
26. Wise B.N. Effects of ultraviolet microbeam irradiation on morphogenesis in *Euplotes* // *Journal of Experimental Zoology*, 1965, Vol. 159, No 2, pp. 241–267.
27. Gaulden M.E., Perry R.P. Influence of The Nucleolus on Mitosis as Revealed by Ultraviolet Microbeam Irradiation // *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 1958, Vol. 44, No6, pp. 553–559.
28. Montgomery P.O'B., Hundley L.L. Ultraviolet microbeam irradiation of the nucleoli of living cells // *Experimental Cell Research*, 1961, Vol. 24, No 1, pp. 1–5.
29. Montgomery P.O., Cook J.E., Karney D. Ultraviolet Microbeam Irradiation in Living Cell Membranes // *Journal of Cell Biology*, 1965, Vol. 26, No 3, pp. 959-961.
30. Sakharov V.N., Voronkova L.N. Nucleolus degradation and growth induced by UV-microbeam irradiation of interphase cells grown in culture // *Journal of Cell Biology*, 1976, Vol. 71, No 3, pp. 963–967.
31. McKerracher L.J., Heath I.B. Fungal nuclear behavior analyzed by ultraviolet microbeam irradiation // *Cell Motility and the Cytoskeleton*, 1986, Vol. 6, No 1, pp. 35–47.

32. Forer A. Local Reduction of Spindle Fiber Birefringence in Living *Nephrotoma Suturalis* (Loew) Spermatocytes Induced by Ultraviolet Microbeam Irradiation // *Journal of Cell Biology*, 1965, Vol. 25, No 1, pp. 95–117.
33. Zirkle R.E. Ultraviolet-Microbeam Irradiation of Newt-Cell Cytoplasm: Spindle Destruction, False Anaphase, and Delay of True Anaphase // *Radiation Research*, 1970, Vol. 41, No. 3, pp. 516-537.
34. Leslie R.I., Pickett-Heaps J.D. Ultraviolet Microbeam Irradiations Investigation of Spindle Elongation of Mitotic Diatoms // *Journal of Cell Biology*, 1983, Vol. 96, No 2, pp. 548-561.
35. Walker R.A., Inoue S. Salmon E.D. Asymmetric behavior of severed microtubule ends after ultraviolet- microbeam irradiation of individual microtubules in vitro // *Cell Biol.*, 1989, Vol. 108, No 3, pp. 931–937.
36. Hughes K., Forer A., Wilson P., Leggiadro C. Ultraviolet microbeam irradiation of microtubules in vitro. The action spectrum for local depolymerization of marginal band microtubules in vitro matches that for reducing birefringence of chromosomal spindle fibres in vivo // *Journal of Cell Science*, 1988, Vol 91, pp. 469-478.
37. Spurck T.P., Stonington O.G., Snyder J.A., Pickett-Heaps J.D., Bajer A., Mole-Bajer J. UV microbeam irradiations of the mitotic spindle. II. Spindle fiber dynamics and force production // *Journal of Cell Biology*, 1990, Vol. 111, No 4, pp. 1505–1518.
38. Ockleford C.D. Ultraviolet light microbeam irradiation of the microtubules in single Heliozoan axopodia // *Experimental cell research*, 1975, Vol. 93, No 1, pp. 127-135.
39. Leslie R.J., Pickett-Heaps J.D. Spindle microtubule dynamics following ultraviolet-microbeam irradiations of mitotic diatoms // *Cell*, 1984, Vol. 36, No 3, pp. 717-727.
40. Jagger J., Prescott D.M., Gaulden M.E. An ultraviolet microbeam study of the roles of nucleus and cytoplasm in division delay, killing, and photoreactivation of *Amoeba proteus* // *Experimental Cell Research*, 1969, Vol. 58, No 1, pp. 35–54.

41. Cremer C., Zorn C., Cremer T. An ultraviolet laser microbeam for 257 nm // *Microsc. Acta*, 1974, Vol. 75, No 4, pp. 331-337.

42. Forer A. In ultraviolet microbeam irradiations, characteristics of the monochromator and lamp affect the spectral composition of the ultraviolet light and probably the biological results // *J. Cell Sci.*, 1991, Vol. 98, No 3, pp. 415-422.

43. Neverova A.L., Uzbekov R.E., Votchal M.S., Zatsepina O.V., Vorobjev I.A. Postmitotic reconstruction of nucleoli in culture cells with UV-microbeam photoinactivated centrosome // *Membr. Cell Biol.*, 1999, Vol. 12, No 6, pp. 805-815.

44. Uzbekov R.E., Votchal M.S., Vorobjev I.A. Role of the centrosome in mitosis: UV micro-irradiation study // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1995, Vol. 29, pp. 163-170.

45. Uzbekov R.E., Vorob'ev I.A. Behavior of the mitotic apparatus after ultraviolet microirradiation of the spindle pole // *Biophysics*, 1996, Vol. 41, No 1, pp. 161-166.

46. Swedak J.A., Forer A. Kinetochore function can be altered by ultraviolet microbeam irradiation without loss of the associated birefringent spindle fibre // *J. Cell Sci.*, 1991, Vol. 100, No 2, pp. 261-268.

47. Ilagan A.B., Forer A. Effects of ultraviolet-microbeam irradiation of kinetochores in crane-fly spermatocytes // *Cell Motil. Cytoskeleton*, 1997, Vol. 36, No 3, pp. 266-275.

48. Forer A., Spurck T., Pickett-Heaps J.D. Ultraviolet microbeam irradiations of spindle fibres in crane-fly spermatocytes and newt epithelial cells: Resolution of previously conflicting observations // *Protoplasma*, 1997, Vol. 197, No 3-4, pp. 230-240.

49. Spurck T., Forer A., Pickett-Heaps J. Ultraviolet microbeam irradiations of epithelial and spermatocyte spindles suggest that forces act on the kinetochore fibre and are not generated by its disassembly // *Cell Motil. Cytoskeleton*, 1997, Vol. 36, No 2, pp. 136-148.

50. Sakharov V.N., Voronkova L.N., Pyruzyan L.A., Lomakina L.Y. Partial chromosomal set labelling induced by ultraviolet microbeam irradiation of mitotic cells // *Nature*, 1976, Vol. 260, pp. 784 - 785.

51. Amenta P.S. The effects of ultraviolet microbeam irradiation on the eosinophil granular leukocytes of *Triturus viridescens* // *The Anatomical Record*, 1962, Vol. 142, No 1, pp. 81–87.

52. Amenta P.S. Ultraviolet microbeam irradiation of vesicle-like bodies in agranular interphase cells cultured from *Triturus viridescens* // *The Anatomical Record*, 1963, Vol. 147, No 3, pp. 423–429.

53. Deak I.I., Defendi V. Effects of Discrete Nuclear UV-microbeam Irradiation on Herpes Virus and SV40 Infection // *Journ. Cell Sci.*, 1975, Vol. 17, pp. 531-538.

54. Czaban B.B., Forer A. Visualization of ultraviolet microbeam irradiation sites with uranyl acetate // *Journal of Microscopy*, 1991, Vol. 164, No 1, pp. 61–65.

55. Stark R.W., Rubio-Sierra F.J., Thalhammer S., Heckl W.M. Combined nanomanipulation by atomic force microscopy and UV-laser ablation for chromosomal dissection // *Eur. Biophys. J.*, 2003, Vol. 32, No 1, pp. 33-39.

56. Quinto-Su P.A., Lai H.-H., Yoon H.H., Sims S.E., Allbritton N.L., Venugopalan V. Examination of laser microbeam cell lysis in a PDMS microfluidic channel using time-resolved imaging // *Lab Chip*, 2008, Vol. 8, No 3, pp. 408–414.

57. Kotsifaki D., Makropoulou M., Serafetinides A.A. Ultra-violet laser microbeam and optical trapping for cell micromanipulation // *Proc. SPIE 6535*, 2007, pp. 65351-1- 65351-9

58. Gradov O.V. Experimental Setups for Ozonometric Microscopy // *Biomedical Engineering*, 2013, Vol. 46, No 6, pp. 260-264.

59. Grigaravicius P., Rapp A., Greulich K.O. A direct view by immunofluorescent comet assay (IFCA) of DNA damage induced by nicking and cutting enzymes, ionizing ¹³⁷Cs radiation, UV-A laser microbeam irradiation and the radiomimetic drug bleomycin // *Mutagenesis*, 2009, Vol. 24, No 2, pp. 191-197.

60. Lohs-Schardin M, Cremer C, Nüsslein-Volhard C. A fate map for the larval epidermis of *Drosophila melanogaster*: localized cuticle defects following irradiation

of the blastoderm with an ultraviolet laser microbeam // *Dev. Biol.*, 1979, Vol. 73, No 2, pp. 239-255.

61. Lohs-Schardin M., Sander K., Cremer C., Cremer T., Zorn C. Localized ultraviolet laser microbeam irradiation of early *Drosophila* embryos: fate maps based on location and frequency of adult defects // *Dev. Biol.*, 1979, Vol. 68, No 2, pp. 533-545.

62. Girton J.R., Berns M.W. Pattern abnormalities induced in *Drosophila* imaginal discs by an ultraviolet laser microbeam // *Dev Biol.*, 1982, Vol. 91, No 1, pp. 73-77.

63. Higgins M.L., Smith M.N., Gross G.W. Selective cell destruction and precise neurite transection in neuroblastoma cultures with pulsed ultraviolet laser microbeam irradiation: an analysis of mechanisms and transection reliability with light and scanning electron microscopy // *J. Neurosci. Methods*, 1980, Vol. 3, No 1, pp. 83-99.

64. Lima S.Q., Miesenböck G. Remote control of behavior through genetically targeted photostimulation of neurons // *Cell*, 2005, Vol. 121, No 1, pp. 141-152.

65. Chambers J.J., Kramer R.H. Light-Activated Ion Channels for Remote Control of Neural Activity // *Methods Cell Biol.*, 2008, Vol. 90, pp. 217–232.

66. Zemelman B.V., Nesnas N., Lee G.A., Miesenböck G. Photochemical gating of heterologous ion channels: remote control over genetically designated populations of neurons // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 2003, Vol. 100, No 3, pp. 352-357.

67. Yizhar O., Fenno L.E., Davidson T.J., Mogri M., Deisseroth K. Optogenetics in neural systems // *Neuron*, 2011, Vol. 71, No 1, pp. 9-34.

68. Weber G., Monajembashi S., Greulich K.O., Wolfrum J. Microperforation of plant tissue with a UV laser microbeam and injection of DNA into cells // *Naturwissenschaften*, 1988, Vol. 75, No 1, pp 35-36.

69. Cremer T., Cremer C., Baumann H., Luedtke E.K., Sperling K., Teuber V., Zorn C. Rabl's model of the interphase chromosome arrangement tested in Chinese hamster cells by premature chromosome condensation and laser-UV-microbeam experiments // *Hum. Genet.*, 1982, Vol. 60, No 1, pp. 46-56.

70. Meldrum R.A., Botchway S.W., Wharton C.W., Hirst G.J. Nanoscale spatial induction of ultraviolet photoproducts in cellular DNA by three-photon near-infrared absorption // *EMBO Rep.*, 2003, Vol. 4, No 12, pp. 1144-1149.

71. Garty G., Chen Y., Turner H.C., Zhang J., Lyulko O.V., Bertucci A., Xu Y., Wang H., Simaan N., Randers-Pehrson G., Yao L.Y., Brenner D.J. The RABiT: a rapid automated biodosimetry tool for radiological triage. II. Technological developments // *Int. J. Radiat. Biol.*, 2011, Vol. 87, No 8, pp. 776-790.

72. Gualda E.J., Vázquez de Aldana J.R., Carmen Martínez-García M., Moreno P., Hernández-Toro J., Roso L., Artal P., Bueno J.M. Femtosecond infrared intrastromal ablation and backscattering-mode adaptive-optics multiphoton microscopy in chicken corneas // *Biomedical Optics Express*, 2011, Vol. 2, No 11, pp. 2950-2960.

73. Tirpalur U. K., König K. Targeted transfection by femtosecond laser // *Nature*, 2002, Vol. 418, pp. 4295-4298

74. Stracke, F., Riemann, I., König, K. Optical nanoinjection of macromolecules into vital cells // *J. Photochem. Photobiol.*, 2005, Vol. 811, pp. 136-142.

75. Шахбазян А. К., Тарантул В. З., Залесский А. Д., Рябова А. В., Лощенов В. Б., Антонов С. А., Гривенников И. А., Кривохарченко А. С., Карменян А. В., Надточенко В. А. Получение химерных бластоцист мыши методами лазерной нанохирургии // *Онтогенез*, 2013, Т. 44, № 6, с. 302-306.

75a. English translation: Shakhbazyan A.K., Tarantul V.Z., Zalessky A.D., Ryabova A.V., Loshchenov V.B., Antonov S.A., Grivennikov I.A., Krivokharchenko A.S., Karmenyan A.V., Nadtochenko V.A. Obtainment of chimeric blastocysts of mice by methods of laser nanosurgery // *Russian Journal of Developmental Biology*, 2013, Vol. 44, No 6, pp. 302-306.

76. Il'ina I.V., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Sitnikov D.S., Agranat M.B., Mikaelyan A.S. Noncontact microsurgery of cell membranes using femtosecond laser pulses for optoinjection of specified substances into cells // *Quantum Electron*, 2013, Vol. 43, No 4, pp. 365–369.

77. Rosenberg H. Untersuchungen über Nervenaktionsströme // Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 1930, Vol. 223, No 1, pp. 120-145.

78. Scheminzky F. Methoden und Ergebnisse der Anwendung von Elektronenröhren in der physiologischen Akustik // Ergebnisse der Physiologie, 1931, Vol. 33, No 1, pp. 702-780.

79. Posener K., Trendelenburg F. Beitrag zur Objektiven Untersuchung der Akustik von Atmungsorganen // Klinische Wochenschrift, 1931, Vol. 10, No 16, p. 741.

80. Koczka J. Photoelektrische Wiedergabe photographischer Herzton-Aufnahmen // Zeitschrift für die gesamte experimentelle Medizin, 1932, Vol. 84, No 1, pp. 455-458.

81. Bekesy G. Über akustische Reizung des Vestibularapparates // Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 1935, Vol. 236, No 1, pp. 59-76.

82. Hartmann W., Wullstein H. Untersuchungen über den Bewegungsvorgang an den schwingenden Stimmlippen von Kehlkopfpräparaten mit verbesserter Photozellenmethode // Archiv für Ohren-, Nasen- und Kehlkopfheilkunde, 1938, Vol. 144, No 4, pp. 348-360.

83. Richter F. Beitrag zur Technik der Registrierung bioelektrischer Potentiale mit der Braunschen Röhre // Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 1938, Vol. 240, No 1, pp. 111-136.

84. Rohracher H. Fehlerquellen und Kontrollmethoden bei gehirnelektrischen Untersuchungen // Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 1939, Vol. 242, No 4, pp. 389-402.

85. Froimovich B.N., Razin S.E., Leibovich K.B., Andreev O.S. Static error in light-beam oscillograph recordings // Measurement Techniques, 1971, Vol. 14, No 3, pp. 431-435.

86. Razin S.E., Shraifeld T.Y. Determination of the static error in the recording channel of a light-beam oscillograph // Measurement Techniques, 1981, Vol. 24, No 7, pp. 537-540.

87. Yakovlev V.T. A method of basic error determination for a light-beam oscillograph time marker // Measurement Techniques, 1984, Vol. 27, No 4, pp. 313-316.

88. Sommer J. Periphere Bahnung von Muskeleigenreflexen als Wesen des Jendrassikschen Phänomens // Deutsche Zeitschrift für Nervenheilkunde, 1940, Vol. 150, No 5-6, pp. 249-262.

89. Jung R., Tönnies J.F. Die Registrierung und Auswertung des Drehnystagmus beim Menschen // Klinische Wochenschrift, 1948, Vol. 26, No 33-34, pp. 513-521.

90. Brecht K., Schmitt L. Fortlaufende Registrierung der Handdruckkraft an Hammergriffen // Arbeitsphysiologie, 1953, Vol. 15, No 3, pp. 188-195.

91. Luthé W. Der Elektroskriptograph // Psychologische Forschung, 1953, Vol. 24, No 2, pp. 194-214.

92. Bauereisen E., Böhme H., Krug H., Peiper U., Schlicher L. Der Einfluß der Inspiration auf den Effektivdruck der intrathorakalen Kreislaufabschnitte // Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 1958, Vol. 266, No 5, pp. 499-511.

93. Wezler K., Stauch M. Spontane Superposition und Tetanus am geschädigten Froschherzen // Archiv für Kreislaufforschung, 1959, Vol. 31, No 3-4, pp. 158-180.

94. Zeitschriftenschau // "Deutsche Hydrografische Zeitschrift", 1952, Vol. 5, Nno. 2-3, pp.158-164.

95. Sprenger E., Böhm N. Qualitative und quantitative Fluoreszenzmikrospektrographie mit dem Leitz-Mikrospektrographen // Histochemie, 1971, Vol. 25, No 2, pp. 163-176.

96. Burtscher J., Malfatti J. Der Einfluss der Schwangerschaft, der Geburt und des Wochenbettes auf die Alkalireserve des Gesamtblutes // Klinische Wochenschrift, 1931, Vol. 10, No 16, pp. 737-741.

97. Marotzky H.-J. Isometrische Kraftmessungen am Hals-Kopf-System bei jungen und alten Menschen // Archiv für orthopädische und Unfall-Chirurgie, mit besonderer Berücksichtigung der Frakturenlehre und der orthopädisch-chirurgischen Technik, 1972, Vol. 74, No 1, pp. 42-62.

98. Brennwald J., Perren S.M. Atem- und pulssynchrone Dimensionsschwankungen des Röhrenknochens // Research in Experimental Medicine, 1973, Vol. 161, No 2, pp. 124-132.

99. Schultz-Coulon H.-J. Die Diagnostik der gestörten Stimmfunktion // Archives of oto-rhino-laryngology, 1980, Vol. 227, No 1-2, pp. 1-169.

100. Ryzhova N.M. Cerebral circulation under reflex influences // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 1957, Vol. 43, No 2, pp. 139-142.

101. Blinova A.M., Ryzhova N.M. Reflex control of cerebral circulation // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 1957, Vol. 44, No 6, pp. 1413-1417.

102. Blinova A.M., Ryzhova N.M. The significance for the cerebral blood supply of anastomoses between the branches of the external and internal carotid arteries // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 1962, Vol. 52, No 2, pp. 869-873.

103. Busygin V.E. A photographic method of recording the arterial blood pressure // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 1959, Vol. 48, No 2, pp. 1037-1039.

104. Garbulinski T., Gosk A., Mchedlishvili G.I. Photohemotachometric investigations of the functions of the neuromuscular apparatus of the internal carotid arteries. Report 1. Experimental method and the effects of certain physiologically active substances // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 1964, Vol. 55, No 1, pp. 4-8.

105. Kiryushina I.N. Effect of hypercapnia on the blood supply to the heart in chronic experimental conditions // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 1964, Vol. 57, No 3, pp. 263-266.

106. Korkach V.I. Effect of catecholamines on temperature, oxygen tension, and blood flow in skeletal muscles // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 1968, Vol. 65, No 3, pp. 252-254.

107. Matyushkin D.P. A photographic attachment to a cathode-ray oscillograph for use as a photokymograph // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 1963, Vol. 53, No 4, pp. 480-481.

108. Gall V., Gall D., Hanson J. Larynx-fotokymografie // *Archiv für klinische und experimentelle Ohren-, Nasen- und Kehlkopfheilkunde*, 1971, Vol. 200, No 1, pp. 34-41.

109. Donovan G.E. Modern methods for the graphic registration of the heart beat // *The Irish Journal of Medical Science*, 1943, Vol. 18, No 11, pp. 583-591.

110. Pluzhnik V.I., Parshukov P.A. Improved light-ray oscillograph with a drum-type magazine // *Measurement Techniques*, 1975, Vol. 18, No 2, pp. 242-243.

111. Konovalov N.A. Using high-speed motion-picture photography and oscillography for studying high-speed processes // *Measurement Techniques*, 1978, Vol. 21, No 9, pp. 1241-1244.

112. Gelman M. M. Electronic measuring equipment of the German Democratic Republic exhibited in Moscow // *Measurement Techniques*, 1967, Vol. 10, No 3, pp. 361-366.

113. Gelman M. M. (M. M. G.) RFT instruments on exhibition in Moscow // *Measurement Techniques*, 1972, Vol. 15, No 3, pp. 487-489.

114. Razin S.E., Shraifeld T. Y. Recording the algebraic sum of electrical signals by means of a Duddell oscillograph // *Measurement Techniques*, 1976, Vol. 19, No 11, pp. 1656-1657.

115. Selenyi P. Galvanometers with photoelectric feed-back // *Hungarica Acta Physica*, 1947, Vol. 1, No 6, pp. 1-8.

116. Milatz J.M.W., van Boort H.J.J., van Laar J., Alkemade C.T.J. A photoelectric relay for measuring voltages of low frequency // *Applied Scientific Research, Section B*, 1955, Vol. 4, No 1, pp. 447-456.

117. Roshkovan G.L. Oscillographic galvanometers for recording fast processes // Measurement Techniques, 1979, Vol. 22, No 6, pp. 679-683.
118. Troitskii E.A. Reduction of dispersion in the natural fluctuations in the moving part of a galvanometer // Measurement Techniques, 1974, Vol. 17, No 10, pp. 1564-1568.
119. Vasil'ev B.V., Kozyrev B.P. Application of a galvanometric amplifier for measuring weak signals // Measurement Techniques, 1966, Vol. 9, No 6, pp. 758-762.
120. Gural'nik S.N. Optimization of the frequency characteristics of loop oscillographic galvanometers // Measurement Techniques, 1966, Vol. 9, No 8, pp. 1086-1087.
121. Akhmatov A.S., Bufeev V.A., Korndorf S.F., Tkachenko A.N. Photoamplifier with a contactless tracking photopotentiometer // Measurement Techniques, 1966, Vol. 9, No 10, pp. 1338-1340.
122. Mints M.B. Determination of the dynamic coefficients of a galvanometer with its moving coil immersed in a liquid // Measurement Techniques, 1962, Vol. 5, No 5, pp. 415-417.
123. Mints M.B., Yatmanov B.A. Measurement of the parameters of over-damped mirror galvanometers // Measurement Techniques, 1972, Vol. 15, No 9, pp. 1433-1434.
124. Артамонов В.М., Лебедев Г.П., Хренков П.И. Светолучевые осциллографы. Ленинград, Энергоиздат, 1982, 104 с.
125. Duma V.F., Lee K.S., Meemon P., Rolland J.P. Experimental investigations of the scanning functions of galvanometer-based scanners with applications in OCT // Appl. Opt., 2011, Vol. 50, No 29, pp. 5735-5749.
126. Podoleanu A.G., Dobre G.M., Jackson D.A. En-face coherence imaging using galvanometer scanner modulation // Opt. Lett., 1998, Vol. 23, No 3, pp. 147-149.

127. Xue G., Yeung E.S. Fluorescence detection in capillary arrays based on galvanometer step scanning // *Electrophoresis*, 2001, Vol. 22, No 16, pp. 3490-3496.
128. Zhang E., Beard P. Broadband ultrasound field mapping system using a wavelength tuned, optically scanned focused laser beam to address a Fabry Perot polymer film sensor // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2006, Vol. 53, No 7, pp. 1330-1338.
129. Kitahara H., Tani M., Hangyo M. High-repetition-rate optical delay line using a micromirror array and galvanometer mirror for a terahertz system // *Rev. Sci. Instrum.*, 2009, Vol. 80, No 7, pp. 076104.
130. Pillai R.S., Lorensen D., Sampson D.D. Deep-tissue access with confocal fluorescence microendoscopy through hypodermic needles // *Opt. Express*, 2011, Vol. 19, No 8, pp. 7213-7221.
131. Wokosin D.L., Squirrell J.M., Eliceiri K.W., White J.G. Optical workstation with concurrent, independent multiphoton imaging and experimental laser microbeam capabilities // *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, Vol. 74, No 1, pp. 193–201.
132. Zook J.D. Light beam deflector performance: a comparative analysis // *Appl. Opt.*, 1974, Vol. 13, No 4, pp. 875-887.
133. Li Y, Katz J. Laser beam scanning by rotary mirrors. I. Modeling mirror-scanning devices. *Appl Opt.* 1995 Oct 1;34(28):6403-6416.
134. Neuman K.C., Block S.M. Optical trapping // *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, Vol. 75, No 9, pp. 2787–2809.
135. Taylor P.K., Wynn-Williams G.M. A modified mirror projection visual evoked potential stimulator for presenting patterns in different orientations // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 1986, Vol. 64, No 1, pp. 81-83.
136. Посудин Ю.И. Биофизик Сергей Чахотин. Киев: Изд-во Нац. аграр. ун-та, 1995. 98 с.
137. Артамонов В.М., Лебедев Г.П., Хренков П.И. Светолучевые осциллографы. Ленинград, "Энергоиздат", 1982, 104 с.

138. Аршила С.В., Борисевич Е.С., Жилевич И.И. Электрографические светолучевые осциллографы. Москва, Энергия, 1978. 144 с.

138. Русинов М.М. Оптика приборов для записи колебаний. Москва - Ленинград. Оборонгиз, 1939. 136 с.

139. Бурьянов Б.П. Магнитоэлектрический осциллограф. Москва - Ленинград, Госэнергоиздат, 1952. 239 с.

140. Борисевич Е.С. (исх.: рус. яз.) Магнитоэлектрические осциллографы для экспериментальных геофизических исследований // *Studia Geophysica et Geodaetica*, 1958, Volume 2, Issue 3, pp. 261-268 [DOI: 10.1007/BF02585175].

141. Troitskii E.A. Reduction of dispersion in the natural fluctuations in the moving part of a galvanometer // *Measurement Techniques*, Vol. 17, Issue 10, pp. 1564-1568 (1974)

142. Gural'nik S.N. Optimization of the frequency characteristics of loop oscillographic galvanometers // *Measurement Techniques*, Vol. 9, Issue 8, pp. 1086-1087 (1966)

143. Mints M.B. Determination of the dynamic coefficients of a galvanometer with its moving coil immersed in a liquid // *Measurement Techniques*, Vol. 5, Issue 5, pp. 415-417 (1962)

144. Mints M.B., Yatmanov B.A. Measurement of the parameters of over-damped mirror galvanometers // *Measurement Techniques*, Vol. 15, Issue 9, pp. 1433-1434 (1972)