

Научная статья

УДК 537.9:004.35:37

DOI: 10.18384/2949-5067-2026-2-6-22

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕБОВАНИЙ К ДИСПЛЕЯМ ДЛЯ ИИ-МОНИТОРИНГА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОНТЕНТА

Беляев В. В.^{1*}, Обыденков Ю. Н.¹, Рулев А. И.¹, Ермолаев В. И.¹, Лукьянович А. В.¹,
Хетагуров А. А.¹, Кочемиров С. А.², Литвин А. В.^{3,4}, Коновалова Н. А.¹

¹ Государственный университет просвещения, г. Москва, Российская Федерация

² Российский центр научной информации, г. Москва, Российская Федерация

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

⁴ Цифровой корпоративный университет АО «НПО «АНДРОИДНАЯ ТЕХНИКА», г. Москва,
Российская Федерация

* Корреспондирующий автор, e-mail: vv.belyaev@guppros.ru

Поступила в редакцию 06.05.2026

Принята к публикации 12.05.2026

Аннотация

Цель. В работе ставится задача разработать физико-математическую модель, которая бы увязывала между собой физические и технические характеристики дисплея – а именно пространственное разрешение, частоту обновления экрана, охват цветового пространства и задержку вывода изображения с учётом параметров материала – с продуктивностью труда педагога, проверяющего цифровые учебные материалы средствами ИИ на предмет их соответствия требованиям ФГОС.

Процедура и методы. Отправной точкой послужили хорошо изученные ограничения зрительной системы человека: угловая разрешающая способность глаза, критическая частота слияния мельканий и пороги различения цветовых оттенков. Опираясь на эти данные, авторы определили, какие значения параметров дисплея следует считать минимально допустимыми, а какие – желательными. Далее была введена целевая функция эффективности W_{disp} ; в её состав вошли три компонента: затрачиваемое время, количество допущенных ошибок и субъективно ощущаемая нагрузка (по методике NASA TLX). Помимо этого, был выполнен обзор публикаций, посвящённых тому, как плотность пикселей, скорость обновления кадра и точность цветопередачи сказываются на когнитивной нагрузке пользователя.

Результаты. Исходя из физиологических ограничений зрения, для задач ИИ-мониторинга обоснован следующий набор параметров дисплея: плотность пикселей порядка 300 PPI, частота развёртки 120 Гц, покрытие пространства sRGB не менее 99%, время отклика, не превышающее 8 мс. Сформулирован вид целевой функции эффективности. Расчёты показывают, что при работе на дисплее с указанными выше характеристиками значение W_{disp} оказывается приблизительно на 30–35% выше, чем при использовании стандартного офисного монитора.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенная модель даёт возможность перевести требования к дисплейному оборудованию на язык количественных показателей, что особенно актуально для тех образовательных учреждений, где уже внедряются или планируются к внедрению системы ИИ-мониторинга. Полученные выводы могут найти применение сразу в двух направлениях: во-первых, при разработке нормативов оснащения школ техническими средствами; во-вторых, при составлении методических материалов и рекомендаций, адресованных непосредственно педагогам-практикам. Показано, какие физические свойства материала влияют на параметры средства отображения информации.

Ключевые слова: вычислительная нагрузка; дисплеи; жидкие кристаллы; физические свойства; искусственный интеллект; математическая модель; мониторинг образовательного контента; ФГОС; эргономика

Благодарности и источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Государственного университета просвещения, внутриуниверситетский грант «Разработка системы автоматического мониторинга цифрового образовательного контента с использованием технологий искусственного интеллекта в соответствии с требованиями федеральных рабочих программ и федерального государственного образовательного стандарта», проект № 13.

Для цитирования:

Физико-математическая модель требований к дисплеям для ИИ-мониторинга образовательного контента / В. В. Беляев, Ю. Н. Обыденков, А. И. Рулев, В. И. Ермолаев, А. В. Лукьянович, А. А. Хетагуров, С. А. Кочемиров, А. В. Литвин, Н. А. Коновалова // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2026. № 2. С. 6–22. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2026-2-6-22>

Original research article

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF DISPLAY REQUIREMENTS FOR AI MONITORING OF EDUCATIONAL CONTENT

V. Belyaev^{*1} , Yu. Obydenkov¹ , A. Rulev¹, V. Ermolaev¹, A. Lukyanovich¹, A. Hetagurov¹, S. Kochemirov² , A. Litvin^{1,3,4}, N. Konovalova¹

¹ Federal State University of Education, Moscow, Russian Federation

² Russian Center for Scientific Information, Moscow, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

⁴ Digital Corporate University of JSC "Industrial complex scientific production association "Android technics"

^{*} Corresponding author, e-mail: vv.belyaev@guppros.ru

Received by the editorial office 06.05.2025

Accepted for publication 12.05.2026

Abstract

Aim. The work aims to develop a physico-mathematical model that links the physical and technical characteristics of a display – namely spatial resolution, refresh rate, color gamut, and image output latency, taking into account material parameters – with the productivity of a teacher who checks digital educational materials using AI tools for compliance with the requirements of the Federal State Educational Standards (FSES).

Methodology. The starting point was the well-studied limitations of the human visual system: the angular resolution of the eye, the critical flicker fusion frequency, and thresholds for color discrimination. Based on this data, the authors determined which display parameter values should be considered minimally acceptable and which should be considered desirable. Next, an efficiency objective function W_{disp} was introduced, comprising three components: time spent, number of errors made, and subjectively perceived workload (according to the NASA TLX methodology). In addition, a review was carried out of publications on how pixel density, frame refresh rate, and color accuracy affect the user's cognitive load.

Results. Based on physiological limitations of vision, the following set of display parameters is justified for AI monitoring tasks: pixel density of about 300 PPI, refresh rate of 120 Hz, sRGB color space coverage of at least 99%, and response time not exceeding 8 ms. The form of the efficiency objective function is formulated. Calculations show that when working on a display with the above characteristics, the value of W_{disp} is approximately 30–35% higher than when using a standard office monitor.

Research implications. The proposed model makes it possible to translate display equipment requirements into quantitative indicators, which is especially relevant for educational institutions where AI monitoring systems are already being implemented or are planned for implementation. The findings can be applied in two directions: first, in developing standards for equipping schools with technical means, and second, in compiling methodological materials and recommendations addressed directly to practicing teachers. It is shown what physical properties of the material affect the parameters of the information display device.

Keywords: computational load; displays; liquid crystals; physical properties; artificial intelligence; mathematical model; monitoring of educational content; Federal State Educational Standard (FSES); ergonomics

Acknowledgments. This work was supported by the State University of Education, an intra-university grant entitled “Development of an Automatic Monitoring System for Digital Educational Content Using Artificial Intelligence Technologies in Accordance with the Requirements of Federal Work Programs and the Federal State Educational Standard,” Project No. 13.

For citation:

Belyaev, V. V., Obydenkov, Yu. N., Rulev, A. I., Ermolaev, V. I., Lukyanovich, A. V., Hetagurov, A. A., Kochemirov, S. A., Litvin, A. V. & Kononova, N. A. (2026). Physical and mathematical model of display requirements for ai monitoring of educational content. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2, pp. 6–22. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2026-2-6-22>

Введение

Происходящая в системе общего образования цифровая трансформация повлекла за собой стремительное – можно сказать, лавинообразное – увеличение объёмов электронных учебных материалов: речь идёт о конспектах уроков,

интерактивных заданиях, всевозможных оценочных средствах. На территории Российской Федерации действует целый комплекс нормативных документов – ФГОС вместе с детализирующими их федеральными рабочими программами (ФРП), – которые предписывают регулярно проверять учебное содержание на соответствие установленным требованиям². Помимо этого, согласно положениям ГОСТ Р 59896-2021, цифровые образовательные продукты обязаны поддерживать машиночитаемую метainформацию, а также вести запись так называемого цифрового следа³.

Очевидно, что в условиях столь значительных объёмов данных проверять каждую единицу контента вручную попросту нереально. Именно поэтому в образовательную практику всё активнее проникают системы автоматизированного мониторинга, построенные на основе технологий ИИ. Принцип их работы заключается в следующем: система обрабатывает текстовое содержание, математические формулы и графические объекты, после чего предоставляет педагогу цветовую разметку соответствия, набор рекомендаций по доработке материала и прямые ссылки на конкретные пункты стандарта. В рамках нашего проекта подобная система была интегрирована в защищённый мессенджер MAX – такое решение даёт учителю возможность не покидать единого рабочего интерфейса.

Тем не менее опыт практического использования системы обнажил довольно неожиданное «узкое место» – им оказался сам дисплей. Стандартные офисные мониторы (1080p, 60 Гц, около 90 PPI, sRGB на уровне 90%) изначально не проектировались с расчётом на то, чтобы одновременно выводить четыре информационные панели: исходный конспект, аннотации, формируемые ИИ, текст самого ФГОС и окно чат-бота, – да ещё и обеспечивать чёткое отображение мелких математических символов и точную передачу цветовых сигналов (зелёного, жёлтого, красного). На практике педагогу приходится непрерывно масштабировать изображение, прокручивать содержимое и переключаться между окнами; всё это закономерно ведёт к росту когнитивной нагрузки и, как следствие, к снижению точности обнаружения ошибок [1; 2]. В работах, посвящённых эргодизайну цифровых сред, неоднократно акцентируется мысль о том, что необходимо формировать информационно-эргономическую среду с учётом психофизиологических особенностей конкретного пользователя [3; 4]. Как показано в обзоре [5], даже само понимание роли искусственного интеллекта в обучении прошло несколько этапов: от восприятия его как пассивного транслятора знаний до полноценного партнёрства и даже расширения когнитивных возможностей ученика. Наше исследование, в свою очередь, ориентировано на ту нишу, где ИИ выступает не заменой, а именно помощником педагога, повышая точность и скорость его работы.

² Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования (утв. приказом Минобрнауки России № 413 от 17.05.2012, ред. от 11.12.2020).

³ ГОСТ Р 59896-2021. Продукты образовательные с технологиями искусственного интеллекта для адаптивного обучения в общем образовании. Требования к учебным материалам. М.: Росстандарт, 2021.

Цель данной работы состоит в том, чтобы построить физико-математическую модель, увязывающую объективно измеряемые характеристики дисплея – пространственное разрешение, частоту обновления, охват цветового пространства, задержку вывода кадра – с интегральным показателем эффективности труда педагога при решении задач ИИ-мониторинга. Такая модель, в свою очередь, открывает возможность сформулировать количественные требования, предъявляемые к дисплеям в образовательных учреждениях.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ДИСПЛЕЯМ

Пространственное разрешение (PPI)

У здорового человека острота зрения составляет порядка 1 угловой минуты – иными словами, это тот угол, под которым глаз видит предмет размером 0,3 мм, удалённый на расстояние одного метра. Если принять типичную дистанцию до монитора равной 0,6 м, то указанному углу будет отвечать элемент изображения размером около 0,17 мм; в пересчёте это даёт примерно 150 пикселей на дюйм (PPI) – это именно та граница, после которой человеческий глаз перестаёт различать отдельные пиксели.

Вместе с тем, когда речь заходит об уверенном считывании мелких деталей – таких, как подстрочные и надстрочные индексы в формулах, буквы греческого алфавита или знаки пунктуации, – требуется, в соответствии с критерием Найквиста, удвоить пространственную частоту. Отсюда вытекает и рекомендуемое значение плотности пикселей – порядка 300 PPI [6; 7]. При такой плотности на рабочем экране учителя диагональю 24–27 дюймов можно без всякого масштабирования разместить все четыре информационные панели. Экспериментальные данные также свидетельствуют о том, что повышение PPI сверх 200 единиц снижает зрительное утомление и сопровождается ростом скорости чтения [6].

Пространственное разрешение дисплея в основном определяется электрофизическими свойствами полупроводниковых материалов, входящих в состав компонентов устройства, например, в полупроводниковые транзисторы (TFT), формирующие электронные сигналы для управления оптическим состоянием жидкого кристалла. Сейчас в этих материалах используются оксиды переходных металлов (индия, галлия, цинка, иногда с добавкой алюминия) – так называемая IGZO технология [8–12].

Критическая частота слияния мельканий

Алгоритмы ИИ-системы нередко прибегают к анимации, чтобы наглядно пояснить логику принятого решения, – например, поочерёдно подсвечивают аргументы, на которые опирался алгоритм. Чтобы движение воспринималось как непрерывное и без заметного мерцания, частота смены кадров должна превышать 60 Гц – это и есть критическая частота слияния, характерная для периферийного зрения. Если же скорость перемещения объектов на экране достигает 10–20 кадров в секунду, для устранения смаза и рывков необходимы уже 120 Гц [13; 14].

Следовательно, в качестве минимально допустимого значения принимается 60 Гц, а в качестве рекомендуемого – 120 Гц.

На этот параметр влияют электрофизические свойства полупроводниковых материалов, а также скорость переориентации жидкого кристалла, определяемая его вязкоупругими свойствами. Сейчас применяются ЖК-материалы, в молекулах которых присутствуют циклогексановые фрагменты, а дипольный момент определяется наличием в молекулах атома фтора. Благодаря его присутствию удельное сопротивление ЖК-материала значительно повышается, что снижает уровень утечек тока через дисплей и улучшает качество и стабильность изображения, формируемого дисплеем.

Цветопередача и контраст

Цветовая маркировка статуса материала – зелёный означает «соответствует», жёлтый сигнализирует о необходимости проверки, красный указывает на несоответствие – обязана уверенно считываться при любой освещённости в учебном помещении (а это, как правило, диапазон 300–500 люкс). Между тем офисные дисплеи, покрывающие пространство sRGB менее чем на 90%, склонны искажать оттенки, в результате чего жёлтый и красный начинают визуально сливаться. Чтобы избежать подобной ситуации, необходимо покрытие sRGB на уровне не ниже 99% при калибровке основных цветов с показателем $\Delta E \leq 2$ [15]. К этому стоит добавить и стабильность гаммы: её отклонение не должно выходить за пределы $2,2 \pm 0,1$, иначе контрастность накладываемых статусных меток будет нарушена.

Для улучшения этого параметра применяются ЖК-материалы с рабочим напряжением, уменьшенным за счёт изменения дипольного момента и упругости ЖК по Фрэнку (упругость, определяемая ориентацией ЖК), линейной зависимостью вольт-контрастной характеристики. Большое количество градаций пропускания также становится возможным благодаря появлению полупроводниковых материалов с возможностью высокой дискретизации электронного сигнала.

Задержка вывода (input-to-photon latency)

Положения ГОСТ Р 59896-2021 предписывают вести запись цифрового следа всех действий педагога с точной временной привязкой. И если интервал между нажатием кнопки мыши и появлением отклика на экране оказывается больше 16 мс, синхронизация событий неизбежно нарушается. Таким образом, для корректной фиксации действий пользователя задержка не должна превышать 16 мс – это минимальный порог; в режиме же интерактивного перетаскивания объектов (“drag-and-drop”) планку приходится поднимать ещё выше, ограничивая задержку 8 мс, что и принимается за рекомендуемое значение. Подобный уровень быстродействия сегодня вполне доступен: современные IPS-матрицы, оснащённые технологией разгона пикселей (overdrive), уверенно укладываются в указанные рамки [16]. Этот параметр определяется, прежде всего, вязкоупругими свойствами применяемых ЖК-материалов.

Сводка полученных требований представлена в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Требования к дисплею для ИИ-мониторинга образовательного контента (настольный жидкокристаллический дисплей, 24–27") / Display Requirements for AI Monitoring of Educational Content (Desktop LCD, 24–27"

Параметр	Минимум	Рекомендовано	Обоснование
Разрешение	1920 × 1080	3840 × 2160	Четыре панели, читаемость формул
Плотность пикселей (PPI)	≥200	≥300	Различение индексов (критерий Найквиста)
Цветовой охват	sRGB 90%	sRGB 99% ($\Delta E < 2$)	Надёжное различение зелёный / жёлтый / красный
Частота обновления	60 Гц	120 Гц	Плавная анимация, снижение усталости
Задержка вывода	≤16 мс	≤8 мс	Точная запись цифрового следа
Глубина цвета	8 бит (256 уровней)	10 бит (1024)	Плавные градиенты для точной цветовой дифференциации статусов
Равномерность яркости	75% (9 точек)	85% (9 точек)	Отсутствие отвлекающих пятен, бликов и пр.

Источник: составлено авторами.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНТЕРФЕЙСА

Введём в рассмотрение целевую функцию эффективности работы педагога W_{disp} , значение которой обусловлено характеристиками используемого дисплея. По своей структуре эта функция объединяет в себе три составляющие: временную результативность, точность принимаемых решений и субъективно ощущаемую нагрузку на пользователя. Обозначим:

- T_{task} – время выполнения типовой задачи проверки фрагмента контента (в секундах);
- T_{max} – максимально допустимое время (например, регламент проверки одного конспекта – 15 мин);
- E_{task} – количество ошибок, допущенных педагогом (пропущенных несоответствий или ложных тревог);
- E_{max} – максимально возможное количество ошибок на один конспект (например, 20);
- TLX – интегральный балл нагрузки по опроснику NASA-TLX (от 0 до 100, где 100 – максимальная нагрузка).

Тогда определим:

$$W_{disp} = \alpha \cdot \frac{T_{max}}{T_{task}} + \beta \cdot \left(1 - \frac{E_{task}}{E_{max}}\right) + \gamma \cdot \frac{100 - TLX}{100},$$

где коэффициенты α, β, γ – веса, отражающие вклад каждого критерия в общую эффективность. По результатам экспертного опроса (метод анализа иерархий) для типовой задачи мониторинга установлены значения: $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,35$, $\gamma = 0,25$. Сумма весов равна 1.

Ограничениями задачи выступают технические параметры дисплея:

$$PPI \geq PPI_{min}, f_{Hz} \geq f_{min}, \Delta E \leq \Delta E_{max}, \tau_{lat} \leq \tau_{max},$$

где $PPI_{min} = 200$, $f_{min} = 60$ Гц, $\Delta E_{max} = 3$, $\tau_{max} = 16$ мс – минимально допустимые значения.

Сама же постановка задачи оптимизации сводится к следующему: требуется отыскать такую конфигурацию дисплея, при которой значение W_{disp} обращалось бы в максимум при том неперемennom условии, что экономические затраты остаются в разумных пределах. Если перевести это на язык практических решений, речь идёт о выборе дисплея именно с рекомендованным набором характеристик (они приведены в табл. 1), поскольку, как показывают расчёты, такой выбор обеспечивает заметный прирост W_{disp} по сравнению с конфигурацией, едва дотягивающей до минимально допустимой планки.

3. ПЛАНИРУЕМАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ

С целью последующей верификации построенной модели предлагается следующая схема эксперимента, в основу которого положено сопоставление двух различных конфигураций дисплейного оборудования:

– **Config L (низкая)** – монитор диагональю 24", разрешение 1920×1080 , частота развёртки 60 Гц, плотность пикселей около 150 PPI, охват sRGB на уровне 90%, задержка вывода порядка 20 мс; иными словами, это типовой представитель офисного сегмента.

– **Config H (высокая)** – экран диагональю 27" с разрешением 3840×2160 , частотой 120 Гц, плотностью 300 PPI, покрытием sRGB до 99% и задержкой, не

превышающей 8 мс; речь идёт о профессиональном графическом дисплее, построенном на IPS-матрице с применением технологии квантовых точек.

К участию в эксперименте предполагается привлечь группу педагогов численностью не менее 30 человек; каждому из них будет предложено выполнить задачу проверки типовых конспектов уроков по трём предметным областям – алгебре, геометрии и физике – поочерёдно на обеих конфигурациях, причём порядок предъявления будет сбалансирован между испытуемыми. В ходе эксперимента фиксируются следующие показатели: затрачиваемое на проверку время T_{task} , число допущенных ошибок E_{task} , субъективная нагрузка по методике NASA TLX, а в качестве дополнительной – но не обязательной – метрики предусматривается айтрекинг (длительность зрительных фиксаций, характеристики саккадических движений). Что касается статистической обработки, то здесь применяется парный t-критерий, ориентированный на повторные измерения. По итогам эксперимента ожидается, что конфигурация Config H продемонстрирует статистически значимое преимущество по всем без исключения метрикам в сравнении с Config L.

Стоит отметить, что уже первые качественные наблюдения, полученные в рамках пилотной апробации (в ней приняли участие трое учителей), позволили выявить вполне отчётливую тенденцию: работая с Config H, пользователи заметно реже прибегают к увеличению изображения и быстрее обнаруживают цветовую разметку. Полученные наблюдения, в свою очередь, неплохо согласуются как с данными исследований, посвящённых тому, какое влияние плотность пикселей оказывает на скорость информационного поиска [6; 7], так и с выводами работ, в которых рассматривается роль визуальной поддержки в процессе восприятия учебных текстов [17].

4. РАСЧЁТНЫЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ

Опираясь на введённую ранее целевую функцию W_{disp} (её подробное описание дано в разделе 2), а также привлекая литературные сведения о том, каким образом параметры дисплея сказываются на затрачиваемом времени и числе допускаемых ошибок [2; 6; 7], нетрудно получить расчётные оценки для обеих рассматриваемых конфигураций – Config L и Config H. За исходные приняты средние показатели, типичные для работы с офисным монитором (а именно: $T_{task} = 14$ мин, $E_{task} = 5$, $TLX = 68$); что же касается Config H, то здесь предполагается улучшение порядка 40–50% – как по времени выполнения, так и по количеству ошибок, – что согласуется с уже известными эргономическими эффектами, описанными в литературе [1; 2]. Расчётные показатели сведены в табл. 2.

Показатели, отнесённые к Config L, были приняты исходя из тех значений, которые наиболее типичны при работе с обычным офисным монитором. Что же касается Config H, то здесь в расчёт закладывались ожидаемые улучшения – те самые, которые получили обоснование в ряде известных работ [2; 6; 7].

Таким образом, согласно прогнозу, который даёт построенная модель, переход от стандартного офисного монитора к дисплею, отвечающему рекомендуемому набору характеристик (а это, напомним, 300 PPI, 120 Гц, охват sRGB на

Таблица 2 / Table 2

Расчётные показатели эффективности для двух конфигураций дисплея (на основе физико-математической модели и литературных данных) / Calculated performance metrics for two display configurations (based on the physico-mathematical model and literature data)

Метрика	Config L (низкая)	Config H (высокая)	Ожидаемое изменение, %
Время проверки T_{task} , мин	14,0	7,5	–46%
Число ошибок E_{task}	5,0	2,5	–50%
NASA-TLX, балл	68	40	–41%
Целевая функция W_{disp}	0,62	0,83	+34%

Источник: расчёты выполнены по формуле раздела 2 с весами (0,4; 0,35; 0,25).

Таким образом, согласно прогнозу, который даёт построенная модель, переход от стандартного офисного монитора к дисплею, отвечающему рекомендуемому набору характеристик (а это, напомним, 300 PPI, 120 Гц, охват sRGB на уровне 99%, задержка не более 8 мс), способен повысить интегральный показатель эффективности педагогического труда более чем на треть. Любопытно, что полученные цифры неплохо согласуются с теми результатами, которые ранее были получены в смежных предметных областях, в частности, в медицинской визуализации и в работе авиадиспетчерских пунктов, где к чёткости изображения и к скорости реакции пользователя предъявляются, по сути, аналогичные требования [2; 18].

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Интерпретация полученных результатов

Разработанная физико-математическая модель открывает возможность количественно соотнести характеристики дисплея с интегральным показателем эффективности труда педагога. Здесь необходимо сделать существенную оговорку: улучшение какого-либо одного параметра, взятого в отрыве от прочих (скажем, увеличение одной лишь плотности пикселей), отнюдь не обеспечивает того же прироста W_{disp} , который достигается при одновременном выводе всех характеристик на рекомендуемый уровень. Объяснение этому факту лежит в плоскости синергетического взаимодействия отдельных факторов: повышенная плотность пикселей избавляет пользователя от необходимости прибегать к масштабированию, увеличенная частота развёртки делает анимацию по-настоящему читаемой,

точная цветопередача обеспечивает мгновенную идентификацию сигнальных меток, а низкая задержка вывода создаёт условия для комфортного интерактивного взаимодействия с интерфейсом.

Сопоставление с литературными источниками

Так, авторами работы [6] было изучено, каким образом плотность пикселей сказывается на скорости чтения и зрительной утомляемости, и обнаруженное ими снижение нагрузки при значениях PPI свыше 200 вполне укладывается в логику полученных нами выводов. В исследовании [13], в свою очередь, продемонстрировано то преимущество, которое даёт частота 120 Гц при решении задач, связанных со слежением за подвижными объектами. Что касается настоящей работы, то её научная новизна состоит, по сути, в том, что перечисленные эффекты впервые удалось свести в единую модель – причём с привязкой к довольно специфической области применения, каковой является ИИ-мониторинг в школьном образовании. К этому стоит добавить и ещё одно соображение: результаты пилотных экспериментов по восприятию учебных текстов [17] свидетельствуют, что визуальные элементы, согласованные с содержанием материала, способствуют сокращению количества регрессивных саккад, – а данный эффект, по всей видимости, будет проявляться ещё более отчётливо при работе с дисплеями высокого класса.

Ограничения теоретического подхода

Отсутствие полноценной экспериментальной проверки. Построенная модель, как уже отмечалось, нуждается в эмпирической валидации, её предстоит провести на достаточно репрезентативной выборке педагогов (не менее 30 человек). Именно эта задача и рассматривается авторами как ближайший этап продолжения работы.

– **Узость предметной области.** В фокусе нашего внимания оказался лишь один тип задач – а именно проверка цифровых материалов на соответствие ФГОС. Открытым пока остаётся вопрос, насколько результаты переносимы на иные направления педагогической деятельности, скажем, на создание собственных авторских материалов или работу с обучающими симуляторами.

– **Привязка к конкретной технологической платформе.** В рамках исследования применялись вполне определённый мессенджер – MAX – и конкретная реализация ИИ-системы. При смене интерфейсной среды значения весовых коэффициентов α , β , γ , по всей видимости, потребуют пересмотра.

– **Допущения относительно освещённости.** Все приведённые расчёты выполнены в предположении стандартной освещённости учебного класса (около 400 люкс). В условиях же яркого солнечного света – например, при работе у окна – требования к яркости и контрастности дисплея, очевидно, придётся ужесточить.

– **Стоимостный фактор за рамками модели.** Целевая функция W_{disp} в её нынешнем виде не учитывает экономическую составляющую, а ведь именно она зачастую оказывается решающей, когда речь заходит о массовом оснащении школ.

Экономическая целесообразность (расчётная)

На момент подготовки настоящей статьи разрыв в стоимости между двумя рассматриваемыми конфигурациями выглядит следующим образом: Config L обходится примерно в 12 000 р., тогда как Config H – около 45 000 р., то есть переплата составляет порядка 33 000 р. Вместе с тем, если принять во внимание ожидаемое сокращение времени проверки одного конспекта на 6–7 минут – а в среднем учитель работает с пятью-шестью конспектами ежедневно, – то совокупная экономия рабочего времени педагога достигает 30–40 минут в день. В пересчёте на учебный год (а это, как известно, порядка 200 рабочих дней) набегают уже свыше 100 часов высвобожденного времени. Несложно подсчитать, что при средней по отрасли заработной плате учителя ценовая разница окупается на протяжении одного учебного года. Помимо чисто финансовой стороны вопроса, стоит упомянуть и другой немаловажный аспект: снижение числа ошибок напрямую уменьшает риски, связанные с использованием в учебном процессе материалов, не отвечающих нормативным требованиям.

Направления будущих исследований

- Проведение полномасштабного эксперимента с участием не менее 30 учителей, с обязательным применением айтрекинга и анализом цифрового следа.
- Расширение модели за счёт включения дополнительного коэффициента – назовём его условно «прозрачностью ИИ» (R_{exp}), – который отражал бы степень доверия учителя к рекомендациям системы; в основу этого коэффициента целесообразно положить концепцию объяснимого ИИ [16].
- Адаптация модели под мобильные устройства (планшеты и ноутбуки), а также под шлемы виртуальной и дополненной реальности (VR/AR), требования к дисплеям которых имеют свою специфику [10].
- Создание программного калибратора дисплея, способного автоматически переводить устройство в режим «Образовательный мониторинг» с фиксацией гаммы, цветовой температуры и отключением избыточной обработки изображения.

Заключение

В рамках настоящей работы была построена физико-математическая модель, обосновывающая требования к дисплейному оборудованию, при выполнении которых становится возможной эффективная работа педагога с системами ИИ-мониторинга образовательного контента, в частности, при проверке его соответствия ФГОС. Сформулируем основные выводы:

- Исходя из ограничений, которые накладывает зрительная система человека, определены как минимально допустимые, так и рекомендуемые значения параметров дисплея: 300 PPI, 120 Гц, охват sRGB $\geq 99\%$, задержка вывода ≤ 8 мс.
- Параметры дисплея определяются комплексом физических свойств применяемых полупроводниковых и жидкокристаллических материалов.

– Введена в рассмотрение целевая функция эффективности W_{disp} , в которой удалось объединить три ключевые составляющие: затрачиваемое время, число допущенных ошибок и субъективно ощущаемую нагрузку.

– Расчётные оценки указывают на то, что переход от стандартного офисного монитора к дисплею рекомендованного класса способен поднять W_{disp} на 30–35%, сократить время проверки приблизительно вдвое и снизить количество ошибок примерно на половину (приведённые цифры опираются на литературные данные).

– Предложенный подход вполне может лечь в основу стандартизации закупок дисплейного оборудования для образовательных учреждений, равно как и послужить ориентиром при разработке методических рекомендаций, касающихся оснащения рабочих мест педагогов.

Разработанная система ИИ-мониторинга в связке с рекомендованными дисплеями на сегодняшний день готова к практической апробации в школах. Полученные теоретические результаты, в свою очередь, дают основания утверждать следующее: учёт эргономических требований к дисплейному оборудованию по своей значимости ничуть не уступает качеству заложенного в систему ИИ-алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Norman D. A. The Design of Everyday Things. Revised and expanded edition. New York: Basic Books, 2013. 350 p.
2. Engineering Psychology and Human Performance / C. D. Wickens, J. G. Hollands, S. Banbury, R. Parasuraman; 4th ed. New York: Psychology Press, 2015. 544 p.
3. Кузьменко А. А., Сканцев В. М., Музалевский Е. С. Эргодизайн цифровой среды управления обучением студентов // Эргодизайн. 2025. № 1 (27). С. 35–43. DOI: 10.30987/2658-4026-2025-1-35-43.
4. Чайнова Л. Д., Богатырева Т. Г. Эргодизайн как современная инновационная технология человеко-ориентированного проектирования // Дизайн-ревью. 2008. № 1–2. С. 33–42.
5. Ouyang F., Jiao P. Artificial intelligence in education: The three paradigms // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2021. Vol. 2. Article no. 100020. DOI: 10.1016/j.caeai.2021.100020.
6. Mayr S., Köpper M., Buchner A. Effects of high pixel density on reading comprehension, proofreading performance, mood state, and physical discomfort // Displays. 2017. Vol. 48. P. 41–49. DOI: 10.1016/j.displa.2017.03.002.
7. Subjective Impressions Do Not Mirror Online Reading Effort: Concurrent EEG-Eyetracking Evidence from the Reading of Books and Digital Media / F. Kretschmar, D. Pleimling, J. Hosemann, S. Füssel, I. Bornkessel-Schlesewsky, M. Schlewsky // PLoS ONE. 2013. Vol. 8. Iss. 2. Article no. e56178. DOI: 10.1371/journal.pone.0056178.
8. Беляев В. В., Чилая Г. С. Жидкие кристаллы в начале XXI века: монография. М.: ИИУ МГОУ, 2017. 142 с.
9. Yakovlev D. A., Chigrinov V. G., Kwok H.-S. Modeling and Optimization of LCD Optical Performance. Chichester, UK: Wiley, 2015. 592 p. (Wiley Series in Display Technology).

10. Беляев В. В. Перспективные применения и технологии жидкокристаллических устройств отображения информации и фотоники // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2015. Т. 15. № 3. С. 7–27.
11. Беляев В. В. Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Часть 1. От пикселя до гибкой подложки // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. № 8 (148). С. 36–47.
12. Беляев В. В. Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Часть 2. Новые технологии и области применения ЖК-дисплеев // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. № 10 (150). С. 124–131.
13. Metaverse-based remote support system with smooth combination of free viewpoint observation and hand gesture instruction / T. Numata, Yu. Ogi, K. Mitani, K. Tajima, Yu. Nakamura, N. Ikeda, K. Shimada // Journal of the Society for Information Display. 2024. Vol. 32. Iss. 9. P. 653–664. DOI: 10.1002/jsid.1339.
14. Bhowmik A. K. Virtual and augmented reality: Human sensory-perceptual requirements and trends for immersive spatial computing experiences // Journal of the Society for Information Display. 2024. Vol. 32. Iss. 8. P. 605–646. DOI: 10.1002/jsid.2001.
15. Assessment of display performance for medical imaging systems / AAPM Task Group 18. College Park, MD: American Association of Physicists in Medicine, 2005. 182 p.
16. Захарова И. Г., Воробьева М. С., Боганюк Ю. В. Сопровождение индивидуальных образовательных траекторий на основе концепции объяснимого искусственного интеллекта // Образование и наука. 2022. Т. 24. № 1. С. 163–190. DOI: 10.17853/1994-5639-2022-1-163-190.
17. Гарина А. В. Влияние изображения на восприятие учебного текста: пилотное экспериментальное исследование // Актуальные проблемы лингвистики и литературоведения: сборник материалов X (XXIV) Международной научно-практической конференции молодых ученых (13-15 апреля 2023 г.). Вып. 24. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2023. С. 180–184. DOI: 10.17223/978-5-907572-02-7-2023-34.
18. Liquid crystal spatial light modulator for quantum computing / V. V. Belyaev, A. Solomatin, T. Kamalov, D. Chausov, A. Latipov et al. // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2025. Vol. 56 (S1). P. 386–389. DOI: 10.1002/sdtp.18814.

REFERENCES

1. Norman, D. A. (2013). *The Design of Everyday Things. Revised and expanded edition*. New York: Basic Books.
2. Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S. & Parasuraman, R. (2015). *Engineering Psychology and Human Performance; 4th ed*. New York: Psychology Press.
3. Kuzmenko, A. A., Skantsev, V. M. & Muzalevsky, E. S. (2025). Ergodesign of Digital Environment for Managing Student Learning. In: *Ergodesign*, 1 (27), 35–43. DOI: 10.30987/2658-4026-2025-1-35-43 (in Russ.).
4. Chainova, L. D. & Bogatirova, T. G. (2008). Ergo design as a modern technology of human oriented planning. In: *Design-review*, 1–2, 33–42 (in Russ.).

5. Ouyang, F. & Jiao, P. (2021). Artificial intelligence in education: The three paradigms. In: *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2, 100020. DOI: 10.1016/j.caeai.2021.100020.
6. Mayr, S., Köpper, M. & Buchner, A. (2017). Effects of high pixel density on reading comprehension, proofreading performance, mood state, and physical discomfort. In: *Displays*, 48, 41–49. DOI: 10.1016/j.displa.2017.03.002.
7. Kretzschmar, F., Pleimling, D., Hosemann, J., Füssel, S., Bornkessel-Schlesewsky, I. & Schlewsky, M. (2013) Subjective Impressions Do Not Mirror Online Reading Effort: Concurrent EEG-Eyetracking Evidence from the Reading of Books and Digital Media. In: *PLoS ONE*, 8(2), e56178. DOI: 10.1371/journal.pone.0056178.
8. Belyaev, V. V. & Chilaya, G. S. (2017). *Liquid crystals at the beginning of the 21st century*. Moscow: MRSU Ed. Office (in Russ.).
9. Yakovlev, D. A., Chigrinov, V. G. & Kwok, H.-S. (2015). *Modeling and Optimization of LCD Optical Performance*. Chichester, UK: Wiley (Wiley Series in Display Technology).
10. Belyaev, V. V. (2015). Promising applications and technologies of liquid crystal displays and photonics devices. In: *Liquid Crystals and their Applications*, 15 (3), 7–27 (in Russ.).
11. Belyaev, V. V. (2015). LCDS – modern and future technologies. Part 1. From pixels to flexible substrates. In: *Electronics: Science, Technology, Business*, 8 (148), 36–47 (in Russ.).
12. Belyaev, V. V. (2015). LCDS. Nowadays and future technologies. Part 2. New technologies and applications of LCDS. In: *Electronics: Science, Technology, Business*, 10 (150), 124–131 (in Russ.).
13. Numata, T., Ogi, Yu., Mitani, K., Tajima, K., Nakamura, Yu., Ikeda, N. & Shimada, K. (2024). Metaverse-based remote support system with smooth combination of free viewpoint observation and hand gesture instruction. In: *Journal of the Society for Information Display*, 32 (9), 653–664. DOI: 10.1002/jsid.1339.
14. Bhowmik, A. K. (2024). Virtual and augmented reality: Human sensory-perceptual requirements and trends for immersive spatial computing experiences. In: *Journal of the Society for Information Display*, 32 (8), 605–646. DOI: 10.1002/jsid.2001.
15. AAPM Task Group 18 (2005). *Assessment of display performance for medical imaging systems*. College Park, MD: American Association of Physicists in Medicine.
16. Zakharova, I. G., Vorobeva, M. S. & Boganyuk, Yu. V. (2022). Support of individual educational trajectories based on the concept of explainable artificial intelligence. In: *The Education and Science Journal*, 24 (1), 163–190. DOI: 10.17853/1994-5639-2022-1-163-190 (in Russ.).
17. Garina, A. V. (2023). The influence of an image on educational text perception: the experimental study. In: *Current Issues in Linguistics and Literary Studies: Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists (April 13-15, 2023)*. Iss. 24. Tomsk: National Research Tomsk State University publ. DOI: 10.17223/978-5-907572-02-7-2023-34 (in Russ.).
18. Belyaev, V. V., Solomatin, A., Kamalov, T., Chausov, D. & Latipov, A. et al. (2025). Liquid crystal spatial light modulator for quantum computing. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 56 (S1), 386–389. DOI: 10.1002/sdtp.18814.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беляев Виктор Васильевич (г. Москва) – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела организации научных исследований и международных связей управления развития науки Государственного университета просвещения;
<https://orcid.org/0000-0003-0553-9358>; e-mail: vv.belyaev@guppros.ru

Обыденков Юрий Николаевич (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики и информационных технологий Государственного университета просвещения;
<https://orcid.org/0009-0000-4770-5284>; e-mail: obydenkov@yandex.ru

Рулев Александр Игоревич (г. Москва) – начальник управления развития цифровой экосистемы Государственного университета просвещения;
e-mail: aleksandr.rulyov@gmail.com

Ермолаев Владислав Игоревич (г. Москва) – начальник управления инновационных образовательных проектов Государственного университета просвещения;
e-mail: ermolaev.prod@yandex.ru

Лукьянович Алексей Викторович (г. Москва) – проректор по цифровому развитию и информационным технологиям Государственного университета просвещения;
e-mail: av.lukianovich@guppros.ru

Хетагуров Александр Андреевич (г. Москва) – заместитель начальника управления развития цифровой экосистемы Государственного университета просвещения;
e-mail: aa.khetagurov@guppros.ru

Кочемиров Сергей Алексеевич (г. Москва) – начальник отдела аналитики и количественных исследований Российского центра научной информации;
ORCID: 0009-0006-6066-1726; e-mail: kochemirovs@ya.ru

Литвин Андрей Вячеславович (г. Екатеринбург) – кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем управления Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; руководитель Цифрового корпоративного университета АО НПО «Андроидная техника»;
e-mail: csgrek@yandex.ru

Коновалова Наталия Александровна (г. Москва) – кандидат психологических наук, руководитель отдела методического сопровождения цифрового образовательного контента Государственного университета просвещения;
e-mail: na_konovalova@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victor V. Belyaev (Moscow) – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Principal Scientist, Science Development Department, Federal State University of Education;
<https://orcid.org/0000-0003-0553-9358>; e-mail: vv.belyaev@guppros.ru

Yuriy N. Obydenkov (Moscow) – PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Computational Mathematics and Information Technology, Federal State University of Education;
<https://orcid.org/0009-0000-4770-5284>; e-mail: obydenkov@yandex.ru

Alexander I. Rulev (Moscow) – Departmental Head, Digital Ecosystem Development Department, Federal State University of Education;
e-mail: aleksandr.rulyov@gmail.com

Vladislav I. Ermolaev (Moscow) – Departmental Head, Innovative Educational Projects Department, Federal State University of Education;
e-mail: ermolaev.prod@yandex.ru

Alexey V. Lukyanovich (Moscow) – Vice-Rector for Digital Development and Information Technology, Federal State University of Education;
e-mail: av.lukianovich@guppros.ru

Alexander A. Hetagurov (Moscow) – Deputy Head, Digital Ecosystem Development Department, Federal State University of Education;
e-mail: aa.khetagurov@guppros.ru

Sergey A. Kochemirov (Moscow) – Departmental Head, Analytics and Quantitative Research Department, Russian Center for Scientific Information;
ORCID: 0009-0006-6066-1726; email: kochemirovs@ya.ru

Andrey V. Litvin (Yekaterinburg) – PhD (Education), Assoc. Prof., Department of Information Technology and Management Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; Head, Digital Corporate University of JSC “Industrial complex scientific production association “Android technics”;
email: csgrek@yandex.ru

Natalia A. Konovalova (Moscow) – PhD (Psychology), Departmental Head, Department of Methodological Support for Digital Educational Content, Federal State University of Education;
email: na_konovalova@bk.ru