



© Д. З. Шибкова, П. А. Байгужин, А. Д. Герасёв, Р. И. Айзман

DOI: [10.15293/2658-6762.2103.07](https://doi.org/10.15293/2658-6762.2103.07)

УДК 159.91+371

## **Влияние технологий цифрового обучения на функциональные и психофизиологические ответы организма: анализ литературы**

Д. З. Шибкова, П. А. Байгужин (Челябинск, Россия), А. Д. Герасёв,  
Р. И. Айзман (Новосибирск, Россия)

***Проблема и цель.** Неоднозначное отношение педагогического сообщества, обучающихся и их родителей к информационной модернизации, различия в региональных образовательных системах по их оснащенности цифровым инструментарием являются основанием для дальнейшего исследования актуальной проблемы, связанной с реализацией федерального проекта «Цифровая школа». Цель статьи – проанализировать векторы воздействия технологий цифрового обучения на функциональное и психофизиологическое состояние организма обучающихся для обоснования безопасного их использования в образовании.*

***Методология.** Проведен теоретический анализ нормативных и правовых документов, новейших научных публикаций по заявленной научной проблеме преимущественно за последние три года с применением методов аналогии, сопоставления, обобщения и конкретизации.*

***Результаты.** Обобщены противоречивые результаты эмпирических исследований, подтверждающих как позитивное, так и негативное влияние различных по технологии и контексту цифровых образовательных гаджетов на психофизиологические и соматические параметры здоровья и успешность обучения. Представлена авторская точка зрения, согласно которой*

---

**Шибкова Дарья Захаровна** – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра спортивной науки Института спорта, туризма и сервиса, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет).

E-mail: [shibkova2006@mail.ru](mailto:shibkova2006@mail.ru)

**Байгужин Павел Азифович** – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра спортивной науки Института спорта, туризма и сервиса, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет).

E-mail: [baiguzhinpa@susu.ru](mailto:baiguzhinpa@susu.ru)

**Герасёв Алексей Дмитриевич** – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры анатомии, физиологии и безопасности жизнедеятельности, Новосибирский государственный педагогический университет.

E-mail: [ad-gerasev@yandex.ru](mailto:ad-gerasev@yandex.ru)

**Айзман Роман Иделевич** – доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой анатомии, физиологии и безопасности жизнедеятельности, Новосибирский государственный педагогический университет; научный сотрудник научно-исследовательского центра спортивной науки Института спорта, туризма и сервиса, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет).

E-mail: [aizman.roman@yandex.ru](mailto:aizman.roman@yandex.ru)

позитивный вектор «цифровой» школы будет доминировать над негативным только в тех образовательных организациях, где педагогический коллектив создает образовательную среду, соответствующую гигиенической безопасности жизнедеятельности детей. Необходимым условием для этого является профессиональная подготовка преподавателей, готовых к работе в цифровой среде.

**Заключение.** «Школьные» гаджеты – это инновационный инструментарий, адекватное использование которого способствует повышению качества образования без негативного влияния на психологический комфорт и психосоматическое здоровье обучающейся молодежи.

**Ключевые слова:** реактивность организма; цифровое обучение; функциональные реакции; психофизиологические реакции; информационные технологии; образовательные технологии.

### Постановка проблемы

Федеральный проект «Современная цифровая образовательная среда» направлен на «создание условий для внедрения к 2024 году современной и безопасной цифровой образовательной среды, обеспечивающей формирование ценности к саморазвитию и самообразованию обучающихся образовательных организаций всех видов и уровней, путем обновления информационно-коммуникационной инфраструктуры, подготовки кадров, создания федеральной цифровой платформы»<sup>1</sup>. Вполне вероятно, что Правительство РФ реально выполнит технологическое обеспечение всех учебных заведений страны за период внедрения проекта до 2025 года.

Технические ресурсы в области цифровых технологий обучения в настоящее время разработаны в огромном количестве [25; 36; 37], но проблема сегодняшнего дня – их доступность, методика использования и компетентность пользователей в аспекте безопасности для здоровья обучающихся.

Разнонаправленность результатов исследований о влиянии инновационных технологий на организм обучающихся вызывает в последние годы в отечественной и зарубежной

литературе широкую дискуссию относительно целесообразности масштабной цифровизации образовательной среды [9; 26]. Актуален вопрос о реальной готовности педагогического сообщества к масштабным преобразованиям в образовательном пространстве [33]. Не вызывает сомнения, что для эффективного использования цифровых технологий обучения педагог должен владеть не только «компетенциями цифровой грамотности», но и грамотно применять знания в области оперативной оценки и профилактики неблагоприятных состояний обучающихся (например, утомления), вызванных часто неконтролируемым или нерегламентированным использованием гаджетов. Известно, что практически во всех современных программах профессиональной подготовки учителей существенно снижен объем или даже отсутствуют учебные дисциплины, формирующие целевую здоровьесберегающую компетентность.

В этой связи недостаточный уровень подготовки педагогов по возрастной психологии, гигиене детей и подростков, основам здоровья и здорового образа жизни нередко вызывает у них затруднения при решении вопросов, связанных с проблемами когнитивного, психо-эмоционального и социально-

<sup>1</sup> Паспорт приоритетного проекта «Современная цифровая образовательная среда» (утв. президиумом Совета при президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам (в

редакции протокола от 25 октября 2016 г. № 9). URL: <http://static.government.ru/media/files/8SiLmMBgjAN89vZbUUtmuF5IZYftvOAG.pdf>

поведенческого характера, при использовании в учебном процессе цифровых технологий [1; 3; 13; 16].

Результаты оценки эффективности использования цифровых технологий обучения весьма противоречивы. Так, эффект применения планшетов во время обучения выражен в повышении мотивации обучающихся, но в снижении устойчивости внимания [31; 35].

Малочисленны исследования, в которых представлены способы деятельности учителя (технологии, методики), направленные на облегчение самостоятельной учебной деятельности учащихся в условиях цифрового обучения [32]. Сомнительны, на наш взгляд, варианты цифрового образования, полученного в формате саморегулирующегося сообщества, поддерживающегося полностью в онлайн-среде. Однако, по мнению сторонников данного подхода [24], такие сообщества обеспечивают разнообразие полезных результатов обучения при условии автономной деятельности обучающихся.

В то же время разнонаправленность результатов исследований о влиянии цифровых технологий на организм обучающихся вызывает в последние годы в отечественной и зарубежной литературе широкую дискуссию относительно целесообразности масштабной цифровизации образовательной среды [4; 8; 12; 17; 20; 23 и др.]. Это и побудило нас на основе анализа литературы и собственных данных обосновать принципы безопасного применения информационных технологий в образовании.

*Цель исследования* – проанализировать векторы воздействия технологий цифрового обучения на функциональное и психофизиологическое состояние организма обучающихся для обоснования безопасного их использования в образовании.

### **Методология исследования**

Методологической основой исследования является теоретический анализ нормативных и правовых документов, новейших научных публикаций по заявленной научной проблеме преимущественно за последние три года с применением методов аналогии, сопоставления, обобщения и конкретизации.

### **Результаты исследования**

*Позитивный вектор влияния цифровых технологий на успешность обучения и организмы обучающихся*

В исследованиях ряда отечественных и зарубежных авторов показано, что использование технологий цифрового обучения повышает эффективность образовательного процесса в целом и является абсолютно необходимым в условиях изоляции [5; 7; 26; 28; 31]. Например, отмечена эффективность цифровой технологии – геймификации обучения, выраженная в простоте ее использования, интерактивности, организации деятельности в «зоне ближайшего развития», оперативности контроля и обратной связи деятельности обучающихся [22]. Однако важно дифференцировать типы игр, содержание которых чаще активизирует симпатическую вегетативную реакцию [27].

В исследованиях российских ученых показано благоприятное воздействие цифровых технологий на психоэмоциональное состояние и работоспособность организма обучающихся, активацию их умственной деятельности, повышение учебной мотивации и самостоятельности [1; 21], что особенно важно для детей, имеющих низкий исходный уровень работоспособности и низкую мотивацию к учебной деятельности. Современные интерактивные технологии вносят в процесс обучения яркие трехмерные образы, добавляют взаимо-

действие и игровой элемент, развивают творческие способности, пространственное воображение и навыки проектной деятельности [7].

Одним из эффективных способов применения гаджетов в образовании является использование технологии дополненной реальности. Дополненная реальность (*Augmented Reality, AR, англ.* – расширенная реальность) – область применения компьютерных технологий с новым подходом к познанию. Наглядность, информационная полнота и интерактивность технологии дополненной реальности определяют ее преимущества относительно традиционных методов обучения [7]. На возможность эффективно использовать интерес школьников к мобильным устройствам, взаимодействовать с гаджетами Я. Е. Сергиевская приводит пример личного использования мобильного приложения iLab [19]. Это приложение способствует повышению успеваемости обучающихся, экономит время педагога при подготовке урока и дает новый взгляд на обычные школьные уроки. Эффективность интеграции новых технологий электронного обучения в преподавании иностранных языков подтверждается в исследовании [29]. Цифровой образовательный контент, представленный в виде анимационных рисунков, на уроках математики повышает уровень понимания и усвоения знаний, устраняет вычислительные трудности, обеспечивает организацию самопроверки знаний учащихся, в целом позволяет добиваться более высоких образовательных результатов [14]. Более того, гаджеты все активнее начинают использовать и во внеучебной деятельности [15].

Если резюмировать возможности и перспективы использования цифровых технологий в образовании, то можно заключить, что они обеспечивают:

- повышение эффективности и возможностей получения информации;
- подготовку выпускников образовательных организаций к их использованию во всех сферах жизни;
- доступность образования для всех, независимо от места проживания и материальных возможностей;
- индивидуализацию образовательной траектории для обучающихся;
- снижение объема рутинной нагрузки педагогов;
- постоянную актуализацию образовательного контента без существенных затрат;
- материальную и временную экономию системы образования;
- гибкость выбора учебного материала;
- интерактивность в процессе обучения.

#### *Негативный вектор цифрового обучения*

Вместе с позитивными взглядами на внедрение цифровых технологий имеются вполне обоснованные негативные точки зрения на те же технологии и гаджеты. К негативным последствиям чрезмерного использования цифровых технологий относят ожирение и плохую успеваемость в школе, недостаточную продолжительность сна, агрессивность и асоциальное поведение [30]. Цифровизация, стимулируя подрастающее поколение к постоянному поиску удовольствий, может тормозить развитие логического аппарата подростка, снижать нацеленность на результаты, получаемые в долгосрочной и в среднесрочной перспективе [2]. В исследовании [4] при работе на планшете у учащихся вторых классов выявлено стрессорное повышение систолического и диастолического артериального давления, частоты сердечных сокращений, снижение ударного объема крови на фоне повышения диапазона низкочастотных колебаний varia-

бельности ритма сердца и снижения парасимпатической активности. Указанный комплекс изменений характеризует напряжение адаптации системы кровообращения к умственной деятельности.

Авторы ряда работ [10–12] считают, что допускать к использованию в образовательных организациях новые средства информационно-коммуникационных технологий можно только при наличии заключения об их безвредности для здоровья детей и подростков и обоснованных физиолого-гигиенических и психологических рекомендаций их применения в процессе обучения, воспитания и досуга. Субъективные причины небезопасного использования подростками современных гаджетов, негативных последствий их использования проанализированы в работе [17]. В диагностических целях авторы использовали опросник «Гаджет-зависимость», опросник Г. Айзенка, разработанные авторами анкеты для родителей с целью выявления у детей возможной зависимости от гаджетов. Результаты диагностики гаджет-зависимости у учащихся 8–9 классов общеобразовательных школ показали необходимость дифференцированной профилактической и коррекционной работы по преодолению интернет-зависимости.

При отсутствии мобильного устройства или возможности работать в интернете у школьников развивалась картина абстинентного синдрома с необходимостью немедленно взять в руки телефон. Высокие показатели зависимости характерны для каждой возрастной группы, но наиболее высокие показатели наблюдались у школьников 14–17 лет. Гендерных различий в показателях зависимости от мобильных устройств и интернета в школьном возрасте не было обнаружено [6].

Сотрудниками НИИ Возрастной физиологии РАО подготовлен ряд обзоров зарубежных и отечественных исследований, обосновывающих негативное влияние средств информатизации на физическую активность детей школьного возраста [8], на функциональное состояние [12], вегетативную регуляцию сердечного ритма, сердечно-сосудистую и эндокринную системы организма школьников [4], на психофизиологическое состояние [13], пищевое поведение [16]. Наличие этих обзоров снимает необходимость еще раз констатировать указанные в них факты.

Обобщая высказанные и собственные наблюдения, касающиеся использования цифровых технологий в обучении, можно указать на следующие возможные негативные последствия:

- риск отрицательного результата (в мире нет педагогической или психолого-педагогической теории цифрового обучения);
- снижение гуманитарного компонента в образовании;
- риск деградации речи, а затем и мышления;
- негативное влияние на физическое и психическое здоровье обучающихся (ухудшение зрения, осанки, формирование интернет-зависимости, психоэмоциональное напряжение и т.д.);
- снижение социализации личности;
- усиление тотального контроля за личностью;
- формирование интернет-зависимости<sup>2</sup>.

### Обсуждение результатов

Примеров позиции авторов, выступающих за цифровизацию процесса обучения или

<sup>2</sup>Влияние современных технических средств на здоровье. URL: <http://cgon.rosпотреbnadzor.ru/content/62/483/>

против нее, более чем достаточно. Дискуссионный аспект данной проблемы снимается обязательным внедрением Федерального проекта «Цифровая школа»<sup>3</sup>, срок внедрения которого обозначен ближайшими тремя годами.

Нам видится, что основная проблема заключается в выработке механизмов обеспечения баланса в системе «Доза цифровизации обучения – Эффект обучения и воспитания». Зависимость «доза – эффект» описывает изменение функционального ответа организма на интенсивность и длительность воздействия цифровых технологий, используемых как в школьном образовании, так и в других сферах жизнедеятельности. Индивидуальный совокупный профиль изменений физиологических и психофизиологических параметров организма обучающегося будет определять позитивен или негативен персональный вектор суммарного воздействия цифровых технологий на личность.

Таким образом, в дискуссии по масштабной цифровизации образования главной является проблема компетентности пользователей информационных технологий в вопросах физиолого-гигиенической безопасности. Опасность/безопасность для здоровья и жизнедеятельности определяется адекватностью или неадекватностью режима их использования.

Однако до настоящего времени *не являются* руководством к действию в большинстве образовательных организаций, семьях или для отдельных пользователей цифровых технологий и школьных гаджетов такие регламентирующие документы, как:

– Концепция информационной безопасности детей (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 декабря

2015 г. № 2471-р, в части создания новой медиа среды), включающая санитарные правила и нормы обеспечения в образовательных организациях гигиенической безопасности для детей информационно-коммуникационных технологий;

– Федеральные рекомендации оказания медицинской помощи обучающимся в условиях использования современных информационно-коммуникационных технологий обучения и информатизации жизнедеятельности детей;

– Федеральные рекомендации по сохранению психического и психологического здоровья и благополучия обучающихся;

– образовательные программы, раскрывающие правила безопасного пользования детьми интернетом;

– мониторинг эффективности обеспечения гигиенической безопасности и защиты детей от негативной информации и ряд других документов.

Реализация системы гигиенической безопасности детей, по мнению научного руководителя Института комплексных проблем гигиены ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора В. Р. Кучмы, позволит обеспечить оптимальное личностное и физическое развитие, сохранение психического и психологического здоровья и благополучия детей в гиперинформационном обществе [9]. В связи с масштабным внедрением электронно-образовательного ресурса в учебный процесс особенно актуальным представляется поиск оптимальных характеристик предъявления информации на экранах с учётом специфики электронного но-

<sup>3</sup>Федеральный проект «Цифровая школа» (результаты).

URL: [https://as-school3.kmr.eduru.ru/media/2020/03/19/1253762967/Federal\\_ny\\_j\\_proekt\\_-\\_Czifrovaya\\_shkola\\_2019-2024.pdf](https://as-school3.kmr.eduru.ru/media/2020/03/19/1253762967/Federal_ny_j_proekt_-_Czifrovaya_shkola_2019-2024.pdf)

сителя и возрастных физиологических особенностей зрительной системы пользователей [10]. Установлено, что наличие исходного утомления зрительного анализатора и нервной системы учащихся и влияние на их психофизиологическое состояние зависит от способов предъявления шрифтового оформления электронных текстов на ноутбуке [13].

Так, оценка учебных занятий с применением электронных планшетов в 7 классах показала, что при гигиенически рациональной организации урока (оптимальная смена видов деятельности, плотность уроков 60–80 %, общая продолжительность работы с планшетом за урок – не более 15 мин., непрерывная – не более 4 мин.), утомленность обучающихся менее выражена, чем при традиционных уроках. Более того, эти занятия способствовали благоприятной динамике показателей функционального состояния центральной нервной системы и психоэмоционального состояния учащихся [10].

Этические, правовые и гигиенические проблемы роботизации, систем искусственного интеллекта, дополненной и виртуальной реальности представлены в работе [3]. Систематизируя возможные расстройства организма при использовании устройств DVR (цифровых видеорегистраторов) и медицинские противопоказания, автор подчеркивает необходимость разработки методов и критериев оценки киберфизических систем на основе развития информационной гигиены и специализированной гигиенической регламентации. Цифровизация несет в себе большие перспективы для развития образования и обеспечивает большие возможности в получении знаний, однако, внедряя цифровые технологии, необходимо заранее определить возможные пути снижения ее негативных последствий [2].

В 2020 г. пандемия, вызванная COVID-19, определила переход школ на онлайн-обучение, что в разы увеличило количество пользователей российских образовательных порталов. Масштабный переход на электронное обучение выявил «узкие» места этой технологии: большая доля преподавателей оказалась не готовой к работе в цифровой среде; многообразие созданных образовательных платформ не смогло справиться с выросшим в несколько раз трафиком; имели место постоянные проблемы с доступом ко многим школьным порталам [5]. Согласно данным компании SimilarWeb среди образовательных веб-сайтов в России в рейтинге наиболее востребованных ресурсов первое место в мае 2020 г. занял сайт «Учи.ру», причем в мировом рейтинге самых посещаемых образовательных веб-сайтов в апреле 2020 г. он находился на втором месте. М. Г. Дубинина считает, что «всеобщее электронное образование возможно в чрезвычайных условиях, но не должно полностью заменить традиционное обучение, которое предполагает не только передачу знаний, но и воспитание, всестороннее и гармоничное развитие личности, формирование социальных навыков» [5].

Ряд авторов [18] считает, что только на уроках информатики обучающий должен овладеть знаниями основных норм и правил информационного взаимодействия, навыками работы с интерактивными информационными ресурсами, способами защиты своей личной информационной сферы от агрессивного внешнего воздействия. С таким тезисом трудно согласиться. Вместе с тем следует признать, что обучение приемам и мерам защиты от некачественной информации, форматов сетевого общения, позволяющих пресекать агрессивное отношение к другим пользователям или бесцельные информационные

«вбросы», действительно, является прерогативой курса информатики. Это обусловлено тем, что поиск информации по существенным признакам включает приемы критического отношения к содержательному компоненту информации [18]. С одной стороны, инновационные технологии и цифровое обучение, которые уже вошли в инструментарий образовательной системы, при их рациональном использовании могут реально снизить уровень «школьного» стресса – основного фактора психоэмоционального напряжения обучающихся – и повысить мотивацию на самоорганизацию и саморегуляцию учащихся в образовательном процессе. С другой стороны, наш опыт многолетнего мониторинга здоровья обучающихся [21] подсказывает, что позитивный вектор «цифровой» школы будет доминировать над негативным только в тех образовательных организациях, где педагогический коллектив создает образовательную среду, соответствующую физиолого-гигиенической безопасности жизнедеятельности детей с учетом возраста и состояния здоровья.

Кроме того, ключевые проблемы при разработке интерактивного цифрового обучения должны решаться на основе оценки особенностей аффективно-эмоциональной сферы обучающихся с последующей соответствующей трансформацией образовательной среды [23].

Мы поддерживаем позицию Т. В. Корниенко и А. А. Потапова [7], указывающих, что от модели запрета гаджетов и жесткого контроля их использования необходимо перейти к формированию у пользователей цифрового интеллекта. Интернет и гаджеты – это в первую очередь инструменты, которыми нужно уметь пользоваться. «Школьные» гаджеты – это инновационный инструментарий, адекватное использование которого будет

способствовать повышению качества образования, без негативного влияния на психологический комфорт и здоровье обучающейся молодежи.

Кроме того, прогресс в цифровизации образовательной среды в целом, а не только образовательного процесса прогнозирует развитие смежных областей, обеспечивающих будущую профессиональную деятельность современных выпускников. Контент «Будущее» в значительной степени является цифровым и технологическим, он включает программное и аппаратное обеспечение, робототехнику, нанотехнологии, геномику и т. д. [34]. Однако контент «Будущее» в той же мере предполагает освоение этики, политики, социологии, языков и других связанных с этим наук. Это «будущее» чрезвычайно интересно сегодняшним учащимся. Кто их этому научит?

### Заключение

Таким образом, можно констатировать наличие разных позиций исследователей относительно функциональных ответов организма на воздействие современных технологий цифрового обучения и использования гаджетов в образовательном процессе. Степень доказательности позитивных и негативных эффектов цифрового обучения недостаточна: прежде всего это связано с невыполнением организационно-методических требований к исследованиям такого рода, которые остаются в ряду самых актуальных как в области медико-биологического, санитарно-гигиенического, психофизиологического, так и педагогического сопровождения обучающихся. Наличие нормативно-правовой базы, регламентирующей документации в этом вопросе не сможет обеспечить безопасность жизнедеятельности детей в информационном пространстве без высокого уровня физиолого-гигиенической



компетентности школьного учителя, вузовского преподавателя и родителей в условиях глобальной информатизации жизнедеятельности обучающихся. Одной из причин низкого уровня всеобщей гигиенической грамотности является исключение из вузовских образовательных программ таких дисциплин, как «Возрастная физиология» и «Гигиена детей и подростков». Наличие дисциплин типа «Информационная безопасность» в программах профильной подготовки учителей информатики не решает проблем формирования соответствующих компетенций у педагогов других профилей подготовки.

Оснований считать, что современный учитель владеет достаточными знаниями, умениями и навыками в области использования цифровых технологий обучения, нет, актуальным остается требование к педагогической деятельности, которое можно кратко заключить в двух выражениях медико-биологической и педагогической наук: «Доза воздействия – Эффект» и «Не навреди». Этому важно учить уже сейчас будущих педагогов и наверстывать упущенное для работающих учителей, применяя законы возрастной физиологии, психофизиологии и школьной гигиены в цифровой педагогике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байгужин П. А., Шибкова Д. З., Айзман Р. И. Факторы, влияющие на психофизиологические процессы восприятия информации в условиях информатизации образовательной среды // *Science for Education Today*. – 2019. – Т. 9, № 5. – С. 48–70. DOI: <https://doi.org/10.15293/2658-6762.1905.04> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41271740>
2. Буцык С. В. «Цифровое» поколение в вузах и школах российского региона: настоящее и будущее // *Стратегические приоритеты*. – 2018. – № 4. – С. 136–145. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37621799>
3. Денисов Э. И. Роботы, искусственный интеллект, дополненная и виртуальная реальность: этические, правовые и гигиенические проблемы // *Гигиена и санитария*. – 2019. – Т. 98, № 1. – С. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-5-10> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36901414>
4. Догадкина С. Б., Ермакова И. В., Кмить Г. В., Рублева Г. В. Влияние умственной нагрузки, выполняемой на планшете и ноутбуке на сердечно-сосудистую и эндокринную системы детей 9 лет // *Новые исследования*. – 2019. – № 2. – С. 5–22. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42427559>
5. Дубинина М. Г. Использование цифровых технологий при обучении в период пандемии коронавируса // *Информационное общество*. – 2020. – № 5. – С. 48–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44307858>
6. Елисеева Е. Ю., Карева А. И. Изучение зависимости от интернета и мобильных устройств у школьников, гендерные и возрастные особенности // *Смоленский медицинский альманах*. – 2019. – № 4. – С. 131–133. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40084202>
7. Корниенко Т. В., Потапов А. А. Медиаобразование в школе с использованием технологии дополненной реальности // *Вестник Белгородского института развития образования*. – 2017. – № 2. – С. 74–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29667896>



8. Криволапчук И. А., Чернова М. Б., Криволапчук И. И. Влияние средств информатизации на физическую активность детей школьного возраста (обзор зарубежных исследований) // Новые исследования. – 2019. – № 1. – С. 5–14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424636>
9. Кучма В. Р. Гигиеническая безопасность гиперинформатизации жизнедеятельности детей // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96, № 11. – С. 1059–1063. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1059-1063> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32398189>
10. Кучма В. Р., Саньков С. В., Барсукова Н. К. Гигиеническая оценка шрифтового оформления электронных текстов, предъявляемых на ноутбуке // Гигиена и санитария. – 2019. – Т. 98, № 12. – С. 1402–1407. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1402-1407> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41661867>
11. Кучма В. Р., Скоблина Н. А. Russian society of school and university health and medicine on guard of health of the rising generation in Russia (for the 10th anniversary of the organization) // Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья. – 2016. – № 1. – С. 46–52. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26129243>
12. Кучма В. Р., Степанова М. И., Сазанюк З. И., Поленова М. А., Александрова И. Э., Березина Н. О., Макарова А. Ю. Гигиеническая оценка влияния учебных занятий с использованием электронных планшетов на функциональное состояние учащихся // Сеченовский вестник. – 2015. – № 3. – С. 35–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37263858>
13. Кучма В. Р., Ткачук Е. А., Тармаева И. Ю. Психофизиологическое состояние детей в условиях информатизации их жизнедеятельности и интенсификации образования // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95, № 12. – С. 1183–1188. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-12-1183-1188> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28089945>
14. Ларин С. В., Чилбак-оол С. В. Анимационные рисунки как средство цифровых технологий обучения математике // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева. – 2020. – № 3. – С. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.25146/1995-0861-2020-53-3-220> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44122545>
15. Макарова Л. В., Лукьянец Г. Н. Гаджеты и их использование учащимися во внешкольной деятельности // Новые исследования. – 2019. – № 1. – С. 15–24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424637>
16. Макеева А. Г. Как вовлеченность школьников в использование цифровых устройств влияет на их поведение, связанное с питанием // Новые исследования. – 2019. – № 1. – С. 49–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424640>
17. Максимов А. С., Мануйлова Л. М. Диагностика влияния рисков интернет пространства при использовании школьниками старшего подросткового возраста гаджетов // Наука о человеке: гуманитарные исследования. – 2018. – № 1. – С. 94–100. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2018.31.94> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32782533>
18. Роберт И. В., Козлов О. А., Мухаметзянов И. Ш., Поляков В. П., Шихнабиева Т. Ш., Кастирова В. А. Актуализация содержания предметной области «информатика» основной школы в условиях научно-технического прогресса периода цифровых технологий // Наука о человеке: гуманитарные исследования. – 2019. – № 3. – С. 58–72. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2019.37.58> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41489865>



19. Сергиевская Я. Е. Мобильная лаборатория в кармане // *Инновации*. – 2014. – № 10. – С. 7–9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23103995>
20. Шарапов А. Н., Догадкина С. Б., Кмить Г. В., Ермакова И. В., Рублева Л. В., Безобразова В. Н. Влияние компьютерных технологий обучения на вегетативную регуляцию сердечного ритма, сердечно-сосудистую и эндокринную системы организма школьников. Аналитический обзор современной зарубежной литературы // *Новые исследования*. – 2019. – № 1. – С. 36–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424639>
21. Шибкова Д. З., Байгужин П. А., Семенова М. В., Шибков А. А. Морфофункциональные и психофизиологические особенности адаптации школьников к учебной деятельности: монография. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуманитарно-пед. ун-та, 2016. – 380 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26847221>
22. Acquah E. O., Katz H. T. Digital game-based L2 learning outcomes for primary through high-school students: A systematic literature review // *Computers and education*. – 2020. – Vol. 143. – P. 103667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103667>
23. Arguel A., Lockyer L., Kennedy G., Lodge J. M., Pachman M. Seeking optimal confusion: a review on epistemic emotion management in interactive digital learning environments // *Interactive learning environments*. – 2019. – Vol. 27 (2). – P. 200–210. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1457544>
24. Blayone T. J. B., Vanoostveen R., Barber W., DiGiuseppe M., Childs E. Democratizing digital learning: theorizing the fully online learning community model // *International journal of educational technology in higher education*. – 2017. – Vol. 14 (1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s41239-017-0051-4>
25. Davis D., Chen G. L., Hauff C., Houben G. J. Activating learning at scale: A review of innovations in online learning strategies // *Computers and education*. – 2018. – Vol. 125. – P. 327–344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.019>
26. Haßler B., Major L., Hennessy S. Tablet use in schools: A critical review of the evidence for learning outcomes // *Journal of Computer Assisted Learning*. – 2015. – Vol. 32 (2). – P. 139–156. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcal.12123>
27. Halimi M. Y., Saat N. Z. M., Kamaralzaman S., Hanawi S. A. Physiology response with different type of digital game among typical children // *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences*. – 2019. – № 4. – P. 139–147. DOI: <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00014>
28. Krumsvik R. J., Berrum E., Jones L. Ø. Everyday Digital Schooling – implementing tablets in Norwegian primary school. Examining outcome measures in the first cohort // *Nordic Journal of digital literacy*. – 2018. – Vol. 13 (3). – P. 152–176. DOI: <https://doi.org/10.18261/issn.1891-943x-2018-03-03>
29. Kulakova N. S. Digital technologies in teaching foreign languages in terms of e-learning // *Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования*. – 2020. – № 11. – С. 305–307. DOI: <https://doi.org/10.36683/2500-249X/2020-11/305-307> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42917438>
30. Law D. Waiting for the barbarians: Seeking solutions or awaiting answers? // *Envisioning Future Academic Library Services: Initiatives, Ideas and Challenges* / S. McKnight (Ed.). – 2010. – P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.29085/9781856048750.003>
31. Lin M.-H., Chen H.-C., Liu K.-S. A Study of the Effects of Digital Learning on Learning Motivation and Learning Outcome // *Eurasia Journal of Mathematics Science and Technology Education*. – 2017. – Vol. 13 (7). – P. 3553–3564. DOI: <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00744a>



32. Morris T. H., Rohs M. The potential for digital technology to support self-directed learning in formal education of children: a scoping review // *Interactive learning environments*. – 2021. – P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1870501>
33. Padilla-Hernandez A. L., Gamiz-Sanchez V. M., Romero-Lopez M. A. Proficiency levels of teachers' digital competence: a review of recent international frameworks // *Innoeduca-international Journal of technology and educational innovation*. – 2019. – Vol. 5 (2). – P. 140–150. DOI: <https://doi.org/10.24310/innoeduca.2019.v5i2.5600>
34. Prensky M. Digital Natives, Digital Immigrants Part 1 // *On the Horizon*. – 2001. – Vol. 9 (5). – P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1108/10748120110424816>
35. Ricoy M. C., Sanchez-Martinez C. A systematic review of tablet use in primary education // *Revista Espanola de pedagogia*. – 2020. – Vol. 78 (276). – P. 273–290. DOI: <https://doi.org/10.22550/REP78-2-2020-04>
36. Sormunen M., Saaranen T., Heikkila A., Sjogren T., Koskinen C., Mikkonen K., Kaariainen M., Koivula M., Salminen L. Digital Learning Interventions in Higher Education A Scoping Review // *Cin-computers informatics nursing*. – 2020. – Vol. 38 (12). – P. 613–624. DOI: <https://doi.org/10.1097/CIN.0000000000000645>
37. Weber B., Fischer T., Riedl R. Brain and autonomic nervous system activity measurement in software engineering: A systematic literature review // *The Journal of Systems and Software*. – 2021. – Vol. 178. – P. 110946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.110946>



Daria Zakharovna Shibkova

Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk,  
Russian Federation.

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8583-6821>

E-mail: [shibkova2006@mail.ru](mailto:shibkova2006@mail.ru)

Pavel Azifovich Baiguzhin

Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk,  
Russian Federation.

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5092-0943>

E-mail: [baiguzhinpa@cusu.ru](mailto:baiguzhinpa@cusu.ru)

Alexey Dmitrievich Gerasev

Doctor of Biological Sciences, Professor,  
Department of Anatomy, Physiology and Life Safety,  
Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russian Federation.

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6442-3956>

E-mail: [ad-gerasev@yandex.ru](mailto:ad-gerasev@yandex.ru)

Roman Idelevich Aizman

Doctor of Biological Sciences, Professor, Head,  
Department of Anatomy, Physiology and Life Safety,  
Novosibirsk State Pedagogical University;  
Researcher, Institute of Sports, Tourism and Service, South Ural State  
University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation.

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7776-4768>

E-mail: [aizman.roman@yandex.ru](mailto:aizman.roman@yandex.ru)

## The impact of digital learning technologies on functional and psychophysiological responses of the organism: An analytical literature review

### Abstract

**Introduction.** *The ambiguous attitude of professionals in the field of education, students and their parents to modernization based on ICT, differences of regional educational systems in their provision with digital tools have heightened the need for research on the relevant problem associated with the implementation of the federal project called “Digital School”.*

*The purpose of this study is to analyze the vectors of the impact of digital learning technologies on functional and psychophysiological state of students' organisms.*

**Materials and Methods.** *The authors have conducted a theoretical analysis of normative and legislative documents, the latest scholarly publications on the stated problem, mainly for the recent three years, using the methods of analogy, comparison, generalization and concretization.*

**Results.** *The article summarizes the contradictory results of empirical studies confirming both positive and negative effects of digital educational gadgets that differ in technology and context on*



psychophysiological and somatic parameters of health and learning performance. The authors emphasize the idea that the positive vector of the “digital” school can dominate over the negative one only in those educational settings where the teaching staff creates a learning environment aimed at maintaining hygienic safety of children's life. A prerequisite for this is professional development of teachers who are ready to work in a digital environment.

**Conclusions.** “School” gadgets are innovative tools, the adequate use of which contributes to improving the quality of education, without a negative impact on the psychological comfort and psychosomatic health of students.

#### Keywords

Body reactivity; Digital learning; Functional and psychophysiological reactions; Information technologies; Educational technologies; Review; Discussion.

### REFERENCES

1. Baiguzhin P. A., Shibkova D. Z., Aizman R. I. Factors affecting psychophysiological processes of information perception within the context of education informatization. *Science for Education Today*, 2019, vol. 9 (5), pp. 48–70. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.15293/2658-6762.1905.04> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41271740>
2. Butsyk S. V. "Digital" generation in universities and schools of the Russian region: Present and future. *Strategic Priorities*, 2018, no. 4, pp. 136–145. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37621799>
3. Denisov E. I. Robots, artificial intelligence, augmented and virtual reality: Ethical, legal and hygienic issues. *Hygiene and Sanitation*, 2019, vol. 98 (1), pp. 5–10. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-5-10> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36901414>
4. Dogadkina S. B., Ermakova I. V., Kmit' G. V., Rubleva G. V. Influence of mental load during using a tablet or a computer on the cardiovascular and endocrine systems in 9-year-old children. *New Research*, 2019, no. 2, pp. 5–22. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42427559>
5. Dubinina M. G. The use of digital technology in learning during the coronavirus pandemic. *Information Society*, 2020, no. 5, pp. 48–60. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44307858>
6. Eliseeva E. U., Kareva A. I. Studying of dependence on the internet and mobile devices at school students, gender and age features. *Smolensk Medical Almanac*, 2019, no. 4, pp. 131–133. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40084202>
7. Kornienko T. V., Potapov A. A. Media education in school using the technology of augmented reality. *Bulletin of the Belgorod Institute of Education Development*, 2017, no. 2, pp. 74–83. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29667896>
8. Krivolapchuk I. A., Chernova M. B., Krivolapchuk I. I. Influence of informatization on physical activity in schoolchildren (foreign literature review). *New Research*, 2019, no. 1, pp. 5–14. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424636>
9. Kuchma V. R. The minimization of the impact of information and communication technologies on the health and well-being of children. *Hygiene and Sanitation*, 2017, vol. 96 (11), pp. 1059–1063. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1059-1063> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32398189>
10. Kuchma V. R., Sankov S. V., Barsukova N. K. Hygienic evaluation of the font design of electronic texts presented on a laptop. *Hygiene and Sanitation*, 2019, vol. 98 (12), pp. 1402–1407. (In Russian)



- DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1402-1407> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41661867>
11. Kuchma V. R., Skoblina N. A. Russian society of school and university health and medicine on guard of health of the rising generation in Russia (for the 10th anniversary of the organization). *Problems of School and University Medicine and Health*, 2016, no. 1, pp. 46–52. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26129243>
  12. Kuchma V. R., Stepanova M. I., Sazanyuk Z. I., Polenova M. A., Aleksandrova I. E., Berezina N. O., Makarova A. Yu. The hygienic estimation of influence of training sessions using electronic tablet on functional state of students. *Sechenov Medical Journal*, 2015, no. 3, pp. 35–42. (In Russian) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37263858>
  13. Kuchma V. R., Tkachuk E. A., Tarmaeva I. Yu. Psychophysiological state of children in conditions of informatization of their life activity and intensification of education. *Hygiene and Sanitation*, 2016, vol. 95 (12), pp. 1183–1188. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-12-1183-1188> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28089945>
  14. Larin S. V., Chilbak-ool S. V. Animated images as a means of digital technologies in teaching mathematics. *Bulletin of Krasnoyarsk State Pedagogical University*, 2020, no. 3, pp. 54–61. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.25146/1995-0861-2020-53-3-220> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44122545>
  15. Makarova L. V., Luk'yanets G. N. Gadgets and their use in extracurricular activities. *New Research*, 2019, no. 1, pp. 15–24. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424637>
  16. Makeeva A. G. Studying how using digital devices by school children influences food behavior. *New Research*, 2019, no. 1, pp. 49–54. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424640>
  17. Maksimov A. S., Manuylova L. M. Diagnostics of the internet risks influence when gadgets are used by senior school students. *The Science of Person: Humanitarian Researches*, 2018, no. 1, pp. 94–100. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2018.31.94> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32782533>
  18. Robert I. V., Kozlov O. A., Mukhametzyanov I. Sh., Polyakov V. P., Shikhnabieva T. Sh., Kastornova V. A. Actualizing the “computer science” subject matter in basic school in the conditions of scientific and technical progress in the era of digital technologies. *The Science of Person: Humanitarian Researches*, 2019, no. 3, pp. 58–72. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2019.37.58> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41489865>
  19. Sergievskaya Ya. E. Mobile lab in your pocket. *Innovation*, 2014, no. 10, pp. 7–9. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23103995>
  20. Sharapov A. N., Dogadkina S. B., Kmit' G. V., Ermakova I. V., Rubleva L. V., Bezobrazova V. N. Influence of educational computer technologies on heart-rate vegetative regulation, cardiovascular and endocrine systems in school children. Analytical review of modern foreign literature. *New Research*, 2019, no. 1, pp. 36–48. (In Russian) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42424639>
  21. Shibkova D. Z., Baiguzhin P. A., Semenova M. V., Shibkov A. A. *Morphofunctional and psychophysiological features of adaptation of schoolchildren to educational activities*: monograph. Chelyabinsk. South Ural State Humanitarian and Pedagogical University, 2016, 380 p. (In Russian) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26847221>



22. Acquah E. O., Katz H. T. Digital game-based L2 learning outcomes for primary through high-school students: A systematic literature review. *Computers and Education*, 2020, vol. 143, pp. 103667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103667>
23. Arguel A., Lockyer L., Kennedy G., Lodge J. M., Pachman M. Seeking optimal confusion: A review on epistemic emotion management in interactive digital learning environments. *Interactive Learning Environments*, 2019, vol. 27 (2), pp. 200–210. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1457544>
24. Blayone T. J. B., Vanoostveen R., Barber W., DiGiuseppe M., Childs E. Democratizing digital learning: theorizing the fully online learning community model. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 2017, vol. 14 (1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s41239-017-0051-4>
25. Davis D., Chen G. L., Hauff C., Houben G. J. Activating learning at scale: A review of innovations in online learning strategies. *Computers and Education*, 2018, vol. 125, pp. 327–344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.019>
26. Haßler B., Major L., Hennessy S. Tablet use in schools: A critical review of the evidence for learning outcomes. *Journal of Computer Assisted Learning*, 2015, vol. 32 (2), pp. 139–156. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcal.12123>
27. Halimi M. Y., Saat N. Z. M., Kamaralzaman S., Hanawi S. A. Physiology response with different type of digital game among typical children. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 2019, no. 4, pp. 139–147. DOI: <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00014>
28. Krumsvik R. J., Berrum E., Jones L. Ø. Everyday Digital Schooling – implementing tablets in Norwegian primary school. Examining outcome measures in the first cohort. *Nordic Journal of Digital Literacy*, 2018, vol. 13 (3), pp. 152–176. DOI: <https://doi.org/10.18261/issn.1891-943x-2018-03-03>
29. Kulakova N. S. Digital technologies in teaching foreign languages in terms of e-learning. *Education and Science Without Borders: Basic and Applied Research*, 2020, no. 11, pp. 305–307. DOI: <https://doi.org/10.36683/2500-249X/2020-11/305-307> URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42917438>
30. Law D. Waiting for the barbarians: Seeking solutions or awaiting answers? In S. McKnight (Ed.) *Envisioning Future Academic Library Services: Initiatives, Ideas and Challenges*, 2010, pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.29085/9781856048750.003>
31. Lin M.-H., Chen H.-C., Liu K.-S. a study of the effects of digital learning on learning motivation and learning outcome. *Eurasia Journal of Mathematics Science and Technology Education*, 2017, vol. 13 (7), pp. 3553–3564. DOI: <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00744a>
32. Morris T. H., Rohs M. The potential for digital technology to support self-directed learning in formal education of children: A scoping review. *Interactive Learning Environments*, 2021, pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1870501>
33. Padilla-Hernandez A. L., Gamiz-Sanchez V. M., Romero-Lopez M. A. Proficiency levels of teachers' digital competence: A review of recent international frameworks. *Innoeduca-International Journal of Technology and Educational Innovation*, 2019, vol. 5 (2), pp. 140–150. DOI: <https://doi.org/10.24310/innoeduca.2019.v5i2.5600>
34. Prensky M. Digital natives, digital immigrants. Part 1. *On the Horizon*, 2001, vol. 9 (5), pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1108/10748120110424816>
35. Ricoy M. C., Sanchez-Martinez C. A systematic review of tablet use in primary education. *Revista Espanola de Pedagogia*, 2020, vol. 78 (276), pp. 273–290. DOI: <https://doi.org/10.22550/REP78-2-2020-04>
36. Sormunen M., Saaranen T., Heikkila A., Sjogren T., Koskinen C., Mikkonen K., Kaariainen M., Koivula M., Salminen L. Digital learning interventions in higher education. A scoping review. *Cin-*





*Computers Informatics Nursing*, 2020, vol. 38 (12), pp. 613–624. DOI: <https://doi.org/10.1097/CIN.0000000000000645>

37. Weber B., Fischer T., Riedl R. Brain and autonomic nervous system activity measurement in software engineering: A systematic literature review. *The Journal of Systems and Software*, 2021, vol. 178, pp. 110946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.110946>

Submitted: 19 March 2021

Accepted: 10 May 2021

Published: 30 June 2021



This is an open access article distributed under the [Creative Commons Attribution License](#) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. (CC BY 4.0).