

ДИНАМИКА УМСТВЕННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШКОЛЬНИКОВ В УСЛОВИЯХ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОКЛИМАТА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОМЕЩЕНИЯХ

М. А. Лобкис, И. И. Новикова, С. П. Романенко, А. В. Сорокина 

Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Роспотребнадзора, Новосибирск, Россия

В настоящее время актуальным является изучение неблагоприятного воздействия длительного пребывания обучающихся в условиях, не отвечающих требованиям нормативов по показателям микроклимата и концентрации CO_2 , способного вызывать нарушение самочувствия, снижение показателей умственной деятельности, нарушение адаптационных возможностей организма. Целью работы было оценить динамику умственной работоспособности обучающихся в зависимости от указанных параметров. Показатели температуры, влажности и CO_2 ($n = 673$) регистрировали с помощью «Инженерно-технического модуля» в двух классах. Умственную работоспособность оценивали по коэффициенту работоспособности, показателям кратковременной памяти и внимания ($n = 352$) с использованием аппаратно-программного комплекса «НС-ПсихоТест». Статистическую обработку данных выполняли при уровне значимости $p < 0,05$. Зарегистрированы повышенная температура (до 25,7 °C) и низкая влажность (до 31,3%), а также устойчивое повышение концентрации CO_2 по сравнению с нормой (1000 ppm) до 2586 ppm. Установлено снижение доли учащихся с высокой работоспособностью на 30% к концу дня. Выявлены значимые обратные корреляции умеренной силы между работоспособностью и концентрацией CO_2 ($r = -0,464$, $p < 0,001$), а также слабые — с температурой ($r = -0,327$, $p < 0,001$). Обнаружена сильная обратная связь между утомлением и уровнем CO_2 ($r = -0,599$, $p < 0,001$). Наиболее выраженное ухудшение функционального состояния наблюдалось в периоды максимальных концентраций CO_2 . Исследование выявило взаимосвязь между ухудшением параметров воздушной среды и снижением умственной работоспособности школьников, что обосновывает необходимость мониторинга и профилактических мероприятий.

Ключевые слова: общеобразовательные организации, обучающиеся, гигиенические условия обучения, микроклимат, диоксид углерода, умственная работоспособность, утомление, риски здоровья, профилактика

Вклад авторов: И. И. Новикова, М. А. Лобкис — концепция и дизайн исследования; М. А. Лобкис, С. П. Романенко, А. В. Сорокина — сбор и обработка материала; М. А. Лобкис, С. П. Романенко — статистическая обработка материала; М. А. Лобкис, А. В. Сорокина — написание текста; И. И. Новикова, С. П. Романенко — научное редактирование.

Соблюдение этических стандартов: дизайн исследования предварительно прошел экспертизу в Локальном этическом комитете ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора (протокол № 2 от 1 февраля 2024 г.). Получено предварительное письменное информированное согласие родителей/законных представителей на участие детей в исследовании.

 **Для корреспонденции:** Сергей Павлович Романенко
ул. Пархоменко, д. 7, г. Новосибирск, 630108, Россия; romanenko_sp@niig.su

Статья получена: 25.06.2025 **Статья принята к печати:** 26.12.2025 **Опубликована онлайн:** 31.12.2025

DOI: 10.24075/rbh.2025.149

Авторские права: © 2025 принадлежат авторам. Лицензиат: РНИМУ им. Н. И. Пирогова. Статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

DYNAMICS OF MENTAL PERFORMANCE IN SCHOOLCHILDREN UNDER POOR INDOOR CLIMATE CONDITIONS AND ELEVATED CARBON DIOXIDE LEVELS

Lobkis MA, Novikova II, Romanenko SP , Sorokina AV

Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor, Novosibirsk, Russia

One of the pressing current issues requiring investigation is the adverse effect of prolonged exposure of schoolchildren to substandard indoor climates and elevated CO_2 levels, which can impair their well-being, hinder cognitive performance, and disrupt the body's adaptive capabilities. This study aimed to assess the dynamics of mental performance of students depending on the said parameters, the indoor climate and CO_2 levels. The temperature, humidity, and CO_2 datapoints ($n = 673$) were recorded using an Engineering Technical Module in two rooms. Mental performance was assessed by the performance quotient and indicators of short-term memory and attention ($n = 352$); for this purpose, we used an NS-Psychotest hardware and software complex. In statistical processing, the threshold of significance was set at $p < 0.05$. We registered an increase of temperature up to 25.7 °C, a decrease of humidity to 31.3%, and a steady growth of the concentration of CO_2 from the normal 1000 ppm to substandard 2586 ppm. By the end of the day, the proportion of schoolchildren capable of high-level mental performance had dropped by 30%. We identified significant, moderately strong inverse correlations between performance level and CO_2 concentrations ($r = -0.464$, $p < 0.001$), as well as weak inverse correlations with temperature ($r = -0.327$, $p < 0.001$). A strong inverse relationship was found between fatigue and CO_2 levels ($r = -0.599$, $p < 0.001$); schoolchildren's functional state was poorest when the CO_2 concentration was highest. The study identified a correlation between the deterioration of air quality parameters and reduced mental performance among students, highlighting the necessity for monitoring and preventive interventions.

Keywords: educational institutions, schoolchildren, hygienic learning conditions, microclimate, carbon dioxide, mental performance, fatigue, health risks, prevention

Author contribution: Novikova II, Lobkis MA — concept and design of the study; Lobkis MA, Romanenko SP, Sorokina AV — collection and processing of the material; Lobkis MA, Romanenko SP — statistical processing of the material; Lobkis MA, Sorokina AV — article authoring; Novikova II, Romanenko SP — editing.

Compliance with ethical standards: the study design was previously reviewed by the Local Ethics Committee of the Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor (Minutes No. 2 of February 1, 2024). The parents/legal representatives have filled the informed consent forms for the children's participation in the study.

 **Correspondence should be addressed:** Sergey P. Romanenko
Parkhomenko, 7, Novosibirsk, 630108, Russia; romanenko_sp@niig.su

Received: 25.06.2025 **Accepted:** 26.12.2025 **Published online:** 31.12.2025

DOI: 10.24075/rbh.2025.149

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee: Pirogov University. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Период обучения в школе оказывает существенное влияние на формирование психического и физического здоровья обучающихся, которое зависит от соответствия условий обучения гигиеническим нормативам. Неблагоприятные факторы окружающей среды на фоне увеличения учебной нагрузки истощают резервные возможности организма, что приводит к функциональным отклонениям, нарушениям как психического, так и физического здоровья [1, 2]. При создании благоприятных условий воспитания и обучения одними из важных задач остаются контроль и оздоровление воздушной среды в общеобразовательных учреждениях, определяемой, в частности, показателями параметров микроклимата и содержания углекислого газа (CO_2) [3].

Исследования показали, что длительное пребывание в условиях повышенных концентраций (1000–1500 ppm и более) CO_2 оказывает как острое, так и отсроченное отрицательное влияние на общее самочувствие обучающихся, обусловленное нарушением обменных процессов кровеносной, центральной и дыхательной систем, что выражается в снижении показателей работоспособности и умственной деятельности, повышении утомляемости и низкой сопротивляемости к инфекционным и неинфекционным агентам с ростом числа случаев заболеваний верхних дыхательных путей [4–7].

По данным медиков, у детей, обучающихся в классах с высокой концентрацией CO_2 , часто наблюдаются тяжелое дыхание, одышка, сухой кашель и ринит. У детей-астматиков могут возникать приступы астмы [8]. Из-за повышения концентрации CO_2 в школах увеличивается число пропусков уроков учащимися по болезни. Респираторные инфекции и астма являются основными заболеваниями в таких школах. Повышение концентрации CO_2 в классе отрицательно влияет на результаты учебы детей, снижает их работоспособность. Его рассматривают как фактор риска синдрома хронической усталости и роста числа случаев заболеваний верхних дыхательных путей [9–11].

Согласно исследованиям посещаемости учащихся в зависимости от повышения концентрации CO_2 в учебных аудиториях, проведенным более чем в 400 школах в США, повышение концентрации CO_2 до 1000 ppm приводит к снижению посещаемости на 10–20%, а каждые лишние 100 ppm CO_2 снижают годовую посещаемость учеников на 0,2% [12]. Исследования, проведенные в детских дошкольных учреждениях, показали, что увеличение частоты воздухообмена положительно влияет на посещаемость детских садов: сокращение заболеваемости на 12% наблюдается при каждом часовом увеличении показателя кратности воздухообмена [13].

При повышенном содержании CO_2 в воздухе помещений отмечают рост числа жалоб на быстрое утомление, головную боль, выявленные у трети учащихся младших классов школ Белоруссии при концентрации диоксида углерода в учебных классах выше 1500 ppm [14, 15]. Имеются данные, свидетельствующие о снижении концентрации внимания на 30,0% при концентрации CO_2 выше 600–800 ppm, а при концентрациях более 1500 ppm около 80,0% учащихся испытывают чувство усталости [16]. Несоответствующие нормативным параметрам показатели микроклимата также приводят к нарушению самочувствия, обусловленному физиологическими сдвигами в функциональном состоянии органов и систем [17, 18], влияют на течение процессов адаптации у детей в условиях многокомпонентного воздействия факторов среды образовательных организаций [19].

Таким образом, данные многочисленных исследований свидетельствуют об актуальности изучения влияния качества воздушной среды, обусловленной параметрами микроклимата и содержания углекислого газа в закрытых помещениях с длительным пребыванием в них людей и особенно детей, на функциональное состояние и здоровье.

Важно отметить, что в условиях учебных помещений рост концентрации CO_2 коррелирует с накоплением широкого спектра других антропотоксинов, выделяемых человеком в процессе жизнедеятельности, а также веществ, выделяющихся из отделочных материалов, мебели и учебных принадлежностей. Таким образом, CO_2 в данном контексте можно рассматривать как удобный интегральный индикатор (суррогатный маркер) общего уровня антропогенной нагрузки на воздушную среду закрытого помещения. Следовательно, наблюдаемые эффекты на работоспособность и самочувствие с высокой вероятностью обусловлены сочетанным действием комплекса загрязнителей, косвенным показателем которого является концентрация CO_2 .

Целью исследования было оценить динамику умственной работоспособности школьников в течение учебного дня в зависимости от фактических параметров микроклимата и концентрации углекислого газа в учебных помещениях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали гигиенические, физиологические, аналитические методы исследования.

Измерения фактических показателей микроклимата проводили с помощью разработанного «Инженерно-технического модуля» (сертификат об утверждении типа средств измерений, рег. номер 89313-23) в автоматическом круглосуточном непрерывном режиме в динамике недели. Модуль круглосуточно регистрировал отдельные параметры микроклимата (температуру, относительную влажность воздуха) и концентрацию углекислого газа с фиксацией измеренных значений, с формированием текущих и архивных сводных отчетов, а также с оценкой измерений в сравнении с заданными нормативными диапазонами в форме наглядной визуализации результатов мониторинга.

Измерения проводили в течение недели в двух классах начальной школы, в которых обучались учащиеся 3-го и 4-го классов. В кабинете, где обучались учащиеся 4-го класса (кабинет 1), обучение осуществлялось в первую смену, а в кабинете, где обучались учащиеся 3 класса (кабинет 2), — во вторую смену (число наблюдений — 673). Критериями оценки показателей микроклимата являлись параметры, соответствующие требованиям действующих нормативных документов (СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи»; СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека»), диоксида углерода — межгосударственным стандартам (ГОСТ 30494—2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях»; ГОСТ Р ЕН 13779—2007 «Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования»; EN 13779:2004 «Ventilation for non-residential buildings — performance requirements for ventilation and room-conditioning systems»). Кабинеты имели одинаковые архитектурно-планировочные и санитарно-технические характеристики:

площадь каждого кабинета составляла 54 м² при высоте потолков 3,2 м. Расчетная наполняемость соответствовала санитарным нормам и составляла 25 человек, что обеспечивало минимально допустимый воздушный куб на одного учащегося в размере 6,9 м³. Система отопления была центральной водяной с радиаторами. Регулировка температуры теплоносителя в течение учебного дня отсутствовала. Воздухообмен обеспечивала естественная приточно-вытяжная вентиляция через фрамуги окон и вытяжные каналы; искусственная принудительная вентиляция в кабинетах отсутствовала. Режим проветривания был регламентированным и осуществлялся силами педагогов на переменах в виде сквозного проветривания продолжительностью 5 мин согласно общему школьному графику; специальный мониторинг соблюдения данного режима не проводили. Влажную уборку выполняли два раза в день — в конце первой и второй смены. Важно отметить различия в использовании помещений: кабинет 1 эксплуатировали исключительно в первую смену для занятий 4-го класса, тогда как кабинет 2, где занимался 3-й класс во вторую смену, в первую смену использовали для кружковой деятельности с неполной наполняемостью (до 12 человек).

Умственную работоспособность обучающихся оценивали по показателям коэффициента работоспособности, динамики кратковременной памяти, показателям объема, концентрации и устойчивости внимания с использованием стандартных методик аппаратно-программного комплекса (АПК) «НС-ПсихоТест» в динамике учебного дня трехкратно (в начале, в середине и в конце учебного дня), в течение недели (число наблюдений — 352).

Для исследования умственной работоспособности использовали следующие методики.

1. «Таблицы Крепелина» [20] (оценка динамики умственной работоспособности и выявление утомляемости, три раза в течение учебного дня, $n = 132$), которые представляют собой восемь пар рядов однозначных чисел, в каждой из которых числа расположены друг над другом. По отношению суммы правильно выполненных сложений последних четырех строк (S2) к сумме правильно выполненных сложений первых четырех строк (S1) рассчитывают коэффициент работоспособности ($K_{раб} = S2/S1$).

2. «Память на числа» [21] (оценка динамики кратковременной памяти, два раза в течение учебного дня, $n = 88$). Эффективность мнемонических процессов определяют по количеству правильно найденных чисел, оцениваемых в баллах (2 балла — низкая эффективность, 3 балла — удовлетворительная, 4 балла — средняя, 5 баллов — высокая).

3. Методика Мюнsterберга [22] (оценка концентрации внимания, три раза в течение учебного дня, $n = 132$). Методика направлена на определение концентрации и устойчивости внимания. В тесте за 2 мин необходимо отыскать слова, находящиеся в ряду беспорядочно расположенных букв. Оценивается количество неправильно выделенных и количество пропущенных слов. Уровень устойчивости и концентрации внимания оценивается как низкий, ниже среднего, средний, выше среднего, высокий.

Статистическую обработку данных выполняли, используя методы параметрического и непараметрического анализа. Распределение количественных показателей оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка (при числе исследуемых показателей менее 50) или критерия Колмогорова–Смирнова (при числе исследуемых показателей более 50).

Использовали стандартные методы описательной статистики. Вычисляли средние значения, стандартные отклонения, медиану, максимальные и минимальные значения, 25–75 процентиль, величину и коэффициент вариации размаха.

Сравнительную оценку динамики количественных показателей с расчетом значимости различий при нормальном распределении проводили с помощью параметрического *t*-критерия Стьюдента, а при распределении, отличном от нормального, с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни (две независимые группы) и критерия Вилкоксона (две зависимые группы), критерия Краскела–Уоллиса (несколько независимых групп).

Для исследования взаимосвязи применяли методы корреляционного анализа. В качестве показателя тесноты связи между количественными показателями, имеющими нормальное распределение, использовали коэффициент корреляции Пирсона, а при распределении, отличном от нормального, — ранговую корреляцию Спирмена. Значения коэффициента корреляции интерпретировали в соответствии со шкалой Чеддока со следующими границами: слабая связь (0,1–0,3), умеренная (0,3–0,5), заметная (0,5–0,7), высокая (0,7–0,9), очень высокая (0,9–0,99). Значимость связи оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента, связь считали значимой при $p < 0,05$.

Статистическую обработку проводили с использованием программы STATISTICA 10 (StatSoft; США) и MS Office Excel 2016 (Microsoft; США).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка фактической динамики показателей температуры, относительной влажности воздуха и концентрации CO₂ с целью определения причинно-следственной связи с функциональным состоянием обучающихся показала в целом высокую вариабельность регистрируемых показателей. Средние величины температуры воздуха в первую смену находились в допустимых пределах. Во вторую смену зарегистрированы показатели, превышающие нормативные. Температура воздуха во вторую смену (кабинет 2) была значимо выше, чем в первую смену (кабинет 1) на всех трех уроках ($p < 0,001$ для каждого сравнения). Относительная влажность в кабинете 1 значимо превышала показатели кабинета 2 на всех уроках ($p < 0,001$). Концентрация CO₂ сильно варьировалась в течение учебного дня в обоих кабинетах, достигая значений, значительно превышающих рекомендуемый гигиенический норматив (800–1000 ppm в соответствии с ГОСТ Р ЕН 13779–2007 «Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования»). Значимые различия концентрации CO₂ между сменами наблюдались только на втором уроке ($p = 0,049$). На первом и третьем уроках различия между сменами по концентрации CO₂ не были значимыми ($p > 0,05$). Динамика показателей в пределах каждой смены также заслуживает внимания. В кабинете 1 концентрация CO₂ возрастала от первого ко второму уроку (в среднем с 1312 до 2586 ppm), а к третьему уроку снижалась (2039 ppm), оставаясь высокой. В кабинете 2 концентрация CO₂ увеличивалась от первого ко второму уроку (с 1443 до 2097 ppm) и оставалась практически неизменной на третьем уроке (2098 ppm). Таким образом, выявлены устойчивые различия температуры и влажности между сменами, в то время как различия концентрации CO₂ носят несистематический характер (табл.).

Таблица. Средние показатели микроклимата и концентрации CO_2 на протяжении недели в динамике учебного дня

Показатели $M \pm SD$	Первая смена (кабинет 1)		
	Уроки		
	1	2	3
Температура, $^{\circ}\text{C}$	$22,2 \pm 0,5$	$23,3 \pm 0,4$	$23,3 \pm 0,8$
Относительная влажность, %	$46,5 \pm 2,7$	$52,4 \pm 4,3$	$50,5 \pm 6,0$
Концентрация CO_2 , ppm	$1312,2 \pm 485,4$	$2586 \pm 543,7$	$2039 \pm 823,8$
Показатели $M \pm SD$	Вторая смена (кабинет 2)		
	Уроки		
	1	2	3
Температура, $^{\circ}\text{C}$	$25,7 \pm 0,2$	$25,7 \pm 0,9$	$25,7 \pm 0,2$
Относительная влажность, %	$31,3 \pm 2,5$	$32,5 \pm 5,0$	$33,5 \pm 2,5$
Концентрация CO_2 , ppm	$1443,3 \pm 482,7$	$2097,1 \pm 425,1$	$2097,6 \pm 500,6$

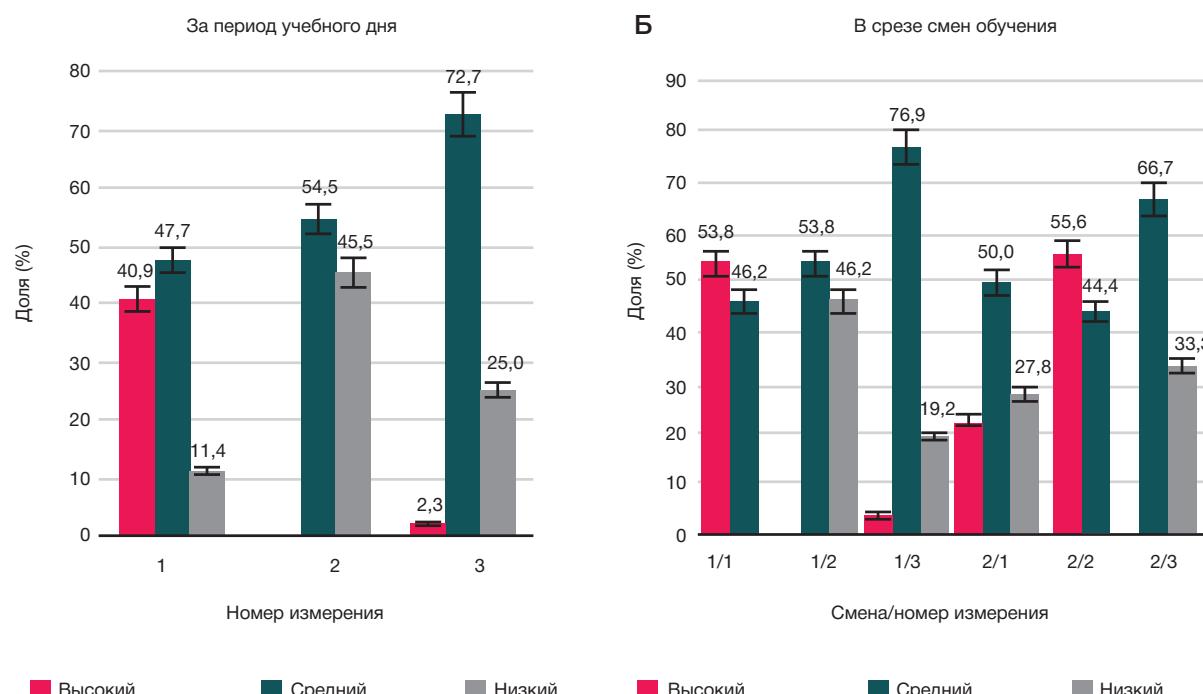
Следует отметить, что при наличии исправного оборудования систем вентиляции и отопления и соблюдении гигиенических требований по проветриванию и уборке учебных помещений параметры микроклимата и концентрации углекислого газа свидетельствуют о недостаточной эффективности профилактических мероприятий, что требует поиска новых инженерных решений для контроля создания оптимальных параметров воздушной среды в учебных помещениях.

При изучении взаимосвязи уровня работоспособности с показателями микроклимата и концентрации углекислого газа в учебном помещении в динамике учебного дня установлено, что с ростом этих показателей от 1-го к 6-му уроку значимо уменьшалось количество обучающихся с высоким уровнем работоспособности — более чем на 30,0% ($p < 0,05$) (рис. 1А). При этом в первую смену обучения отмечено значимое уменьшение доли респондентов с высоким уровнем работоспособности — более чем на 40% ($p < 0,01$ при попарном сравнении долей на 1-м и 6-м уроках). Во вторую смену к завершению учебного дня учащиеся с высоким уровнем работоспособности отсутствовали, при этом различия распределения уровней

работоспособности между началом и концом учебного дня также были значимыми ($p < 0,001$). Указанные изменения, наряду с влиянием изучаемых факторов, могут быть обусловлены закономерным проявлением утомления, накопленного к концу обучения во вторую смену (рис. 1Б).

Характеристика коэффициента работоспособности в зависимости от фактической динамики показателей микроклимата и концентрации углекислого газа представлена на рис. 2. Корреляционный анализ (корреляция Спирмена) выявил значимые обратные взаимосвязи умеренной силы между коэффициентом работоспособности и концентрацией CO_2 ($r = -0,464$, $r^2 = -0,198$, $p = -0,0000$), а также слабые — между коэффициентом работоспособности и температурой воздуха ($r = -0,327$, $r^2 = -0,118$, $p = -0,000$). Связь коэффициента работоспособности с относительной влажностью оказалась незначимой ($r = -0,056$, $r^2 = -0,003$, $p = -0,821$).

Оценка зависимости мнемонических процессов от фактической динамики показателей микроклимата и концентрации углекислого газа (корреляция Спирмена) выявила значимые обратные взаимосвязи умеренной силы между показателями памяти и концентрацией CO_2



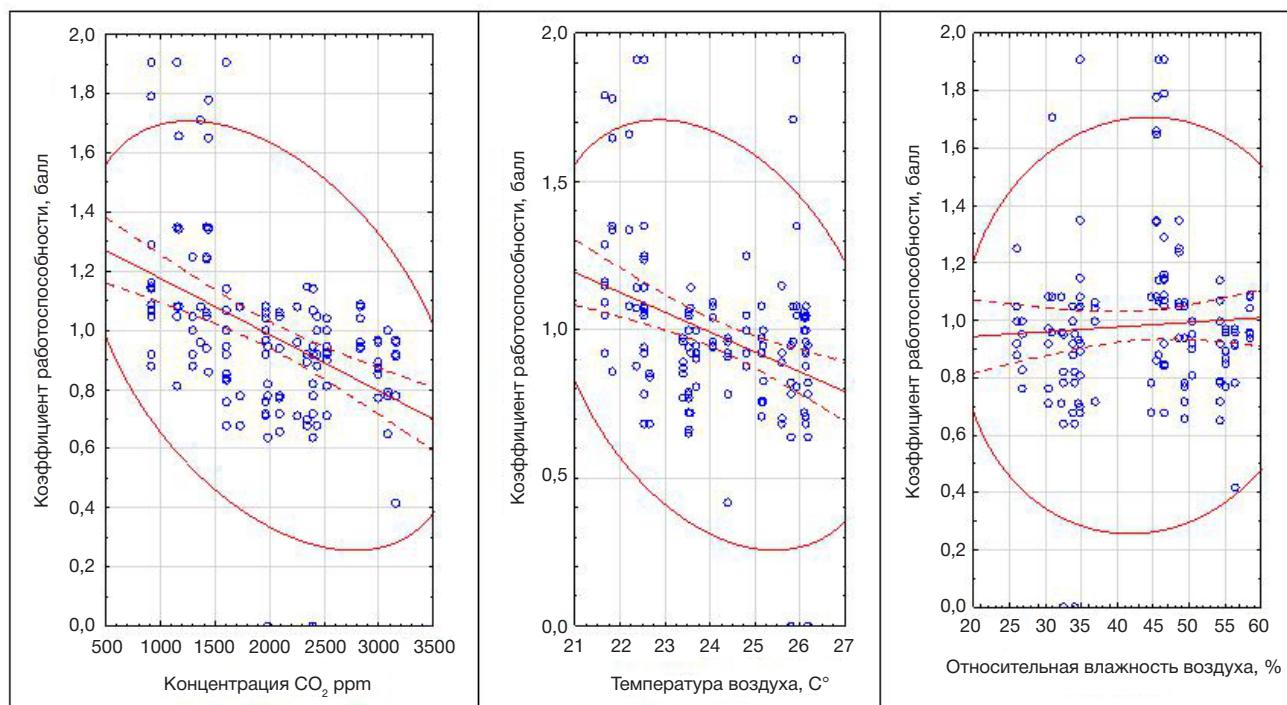


Рис. 2. Диаграмма рассеивания для корреляций между показателями концентрации CO_2 , температуры, относительной влажности воздуха и коэффициентом работоспособности

($r = -0,500$, $r^2 = -0,254$, $p = -0,001$), а также показателями памяти и температурой воздуха ($r = -0,384$, $r^2 = -0,141$, $p = -0,002$). Связь показателей памяти с относительной влажностью воздуха оказалась незначимой ($r = -0,060$, $r^2 = -0,002$, $p = -0,577$).

Сравнительная оценка эффективности кратковременной памяти [21] показала, что в динамике за весь период исследования отмечено снижение доли респондентов с высокой эффективностью кратковременной памяти к концу учебного дня (с 22,7 до 9,1%) и увеличение количества лиц с низкой эффективностью точности и объема кратковременной памяти (с 6,8 до 18,2%)

(рис. 3А). Снижение эффективности кратковременной памяти наблюдается в срезе обеих смен обучения (первая смена — на 15,4%; вторая смена — на 10,9%) (рис. 3Б).

При этом отмечено, что наибольшая доля обучающихся с низкой степенью мнемонической эффективности наблюдается преимущественно в период высоких концентраций углекислого газа (рис. 4).

Проведена оценка избирательности и объема внимания в динамике учебного дня с помощью теста Мюнстерберга [22], позволяющего определить степень утомления в зависимости от фактических показателей микроклимата и концентрации CO_2 .

А



Б

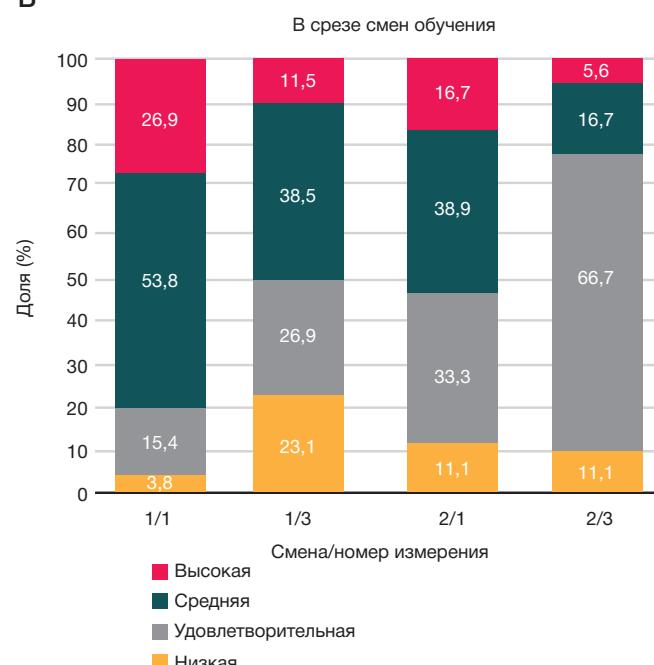


Рис. 3. Характеристика эффективности мнемонических процессов у учащихся в динамике учебного дня, %

Результаты тестирования, отражающие зависимость количества правильных ответов от параметров микроклимата и концентрации CO_2 в учебных помещениях, представлены на рис. 5.

В динамике учебного дня оценка степени утомления в зависимости от фактических показателей микроклимата и концентрации углекислого газа выявила сильную обратную корреляцию между концентрацией углекислого газа и количеством верных ответов как за весь период мониторинга, так и в разрезе смен обучения ($r = -0,599$, $r^2 = -0,359$, $p = -0,0001$). Также подтверждена слабая значимая обратная взаимосвязь между показателями утомления и температурой воздуха ($r = -0,303$, $r^2 = -0,092$, $p = -0,0004$), а также относительной влажностью ($r = -0,244$, $r^2 = -0,059$, $p = -0,005$) за весь период наблюдения.

Установлено, что наибольшая доля респондентов с наивысшими уровнями утомления отмечена в периоды превышения оптимальных показателей концентраций углекислого газа в воздухе общеобразовательной организации (рис. 6).

Оценка структуры распределения обучающихся по степени избирательности и объема внимания также свидетельствует об увеличении доли обучающихся с высоким уровнем утомления в динамике учебного дня. В среднем за весь период наблюдения рост доли детей с высоким уровнем утомления составил 70,4% (с 2,3% в начале до 72,7% в конце уроков); в первую смену — с 3,8 до 65,4%, во вторую смену — с 0 до 77,8%. Это происходит на фоне прогрессирующего ухудшения параметров воздушной среды: исходно повышенные концентрации углекислого газа (табл.) возрастают к середине учебного дня в 1,5–2 раза, значительно превысив гигиенические нормативы. Кроме того, во вторую смену (кабинет 2) на протяжении всего учебного дня регистрировалась температура воздуха, стабильно превышающая допустимые значения, на фоне сниженной относительной влажности воздуха.

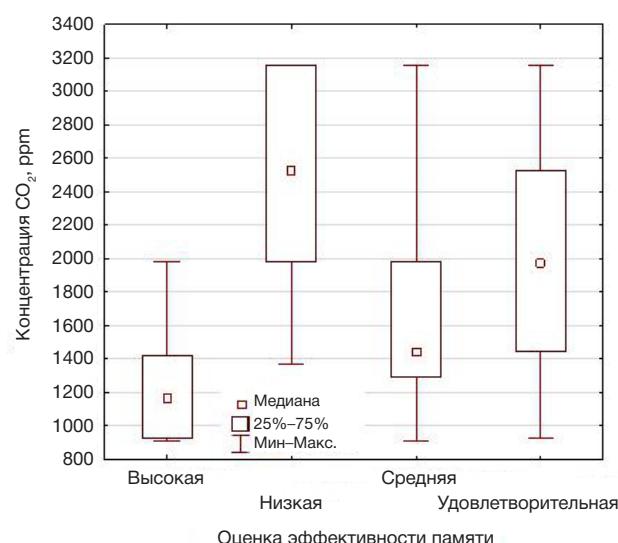


Рис. 4. Распределение учащихся по результатам оценки кратковременной памяти в зависимости от фактических концентраций углекислого газа за весь период мониторинга

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значимость проблемы качества воздуха в учебных помещениях общеобразовательных организаций не подвергается сомнению. Отечественные ученые еще в 1980-е гг. отмечали непосредственное влияние состояния воздушной среды на самочувствие, работоспособность и другие функциональные показатели обучающихся, а также высокую степень вариабельности показателей микроклимата при недостаточном и несовершенном воздухообмене в помещениях [23, 24]. Согласно действующим межгосударственным стандартам (ГОСТ 30494—2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях»; ГОСТ Р ЕН 13779—2007 «Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования»), основным

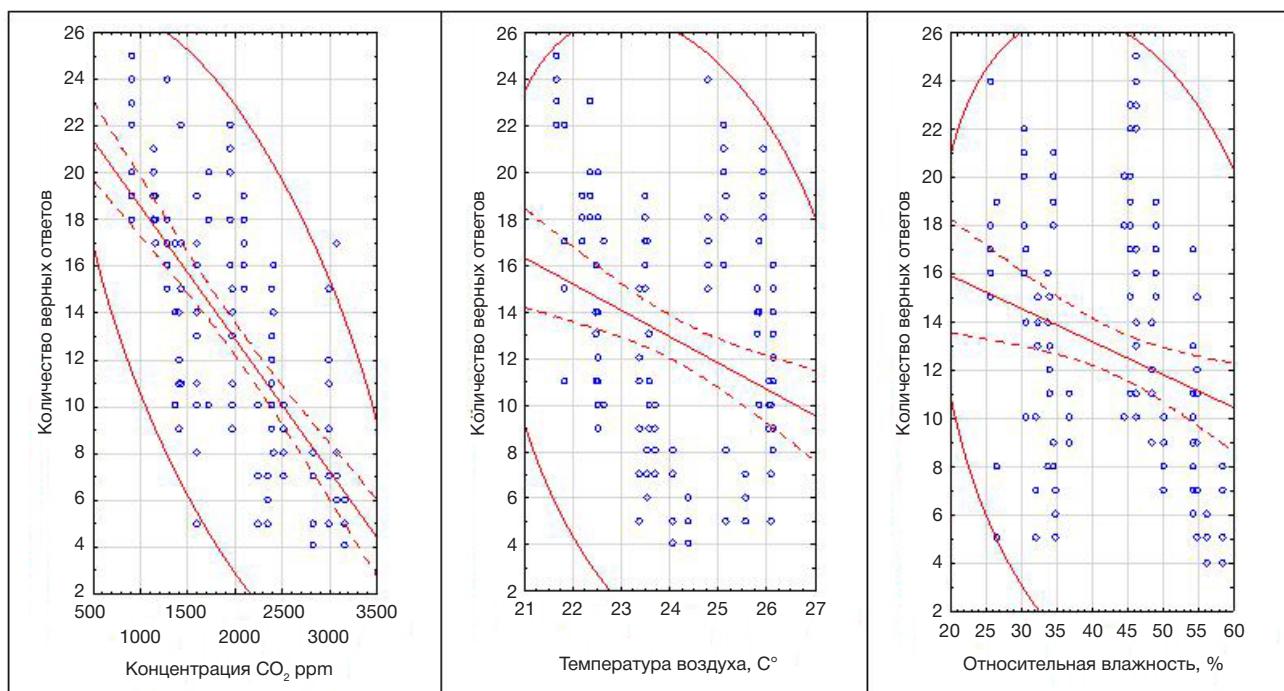


Рис. 5. Диаграмма рассеивания для корреляций между показателями микроклимата, концентрации CO_2 и количеством верных ответов по результатам тестирования

показателем качества воздуха в закрытых помещениях является процентное значение концентрации углекислого газа, который рассматривают и как самостоятельный фактор, и как интегральный маркер антропогенного загрязнения воздуха.

В представленном исследовании при оценке взаимосвязи параметров микроклимата, концентрации CO_2 и умственной работоспособности обучающихся было зафиксировано прогрессирующее ухудшение функционального состояния учащихся в течение дня. Установлено уменьшение на 30,0% числа учащихся с высоким уровнем работоспособности к концу учебного дня при обучении в первую смену и полное отсутствие таких учащихся к концу обучения во вторую смену. Следует подчеркнуть, что наиболее выраженная отрицательная динамика отмечена во вторую смену. Она развивалась на фоне сочетанного неблагополучия: стабильно повышенной в течение всего дня температуры воздуха (превышающей нормативные значения) и значительного роста изначально высокой концентрации CO_2 . Такое сочетание факторов могло потенцировать отрицательный эффект.

Корреляционный анализ подтвердил наличие значимых обратных взаимосвязей, умеренной силы и слабых, между показателями работоспособности, мнемонических процессов, утомления и параметрами микроклимата (концентрацией CO_2 и температурой воздуха). Важно отметить, что хотя наблюдаемые корреляции согласуются с гипотезой о влиянии факторов среды, они не позволяют однозначно установить причинно-следственные связи. Полученные данные свидетельствуют о том, что снижение работоспособности и ухудшение когнитивных функций (памяти, концентрации внимания) в динамике учебного дня происходит параллельно с прогрессирующими ухудшением параметров воздушной среды. Это согласуется с данными литературы, указывающими на снижение когнитивных функций при повышенных концентрациях CO_2 [25] и неблагоприятных параметрах микроклимата [26–29].

Однако необходимо учитывать комплексный характер воздействия. Учебный процесс сам по себе является нагрузкой, закономерно приводящей к утомлению. В рамках настоящего обсервационного исследования невозможно полностью вычленить вклад собственно учебной нагрузки и вклад параметров микроклимата в наблюдаемое ухудшение функционального состояния. Следовательно, более корректным выводом является констатация того, что учебный процесс, протекающий в условиях неблагоприятных параметров воздушно-теплового режима (сочетанное антропогенное загрязнение воздуха, высокая температура, сниженная влажность), ассоциирован с более выраженным развитием утомления и снижением эффективности когнитивных функций у обучающихся. Выявленные взаимосвязи указывают на потенциальную роль этих факторов среды как усугубляющих компонентов в общей картине учебного утомления.

Ограничения и перспективы исследования

К ограничениям исследования можно отнести его наблюдательный дизайн, не позволяющий полностью контролировать все сопутствующие факторы (например, индивидуальную вариабельность утомления, педагогические методики), а также измерение концентрации CO_2 как основного, но не единственного маркера качества воздуха. Для более точного установления причинно-следственных связей и оценки вклада каждого фактора необходимы

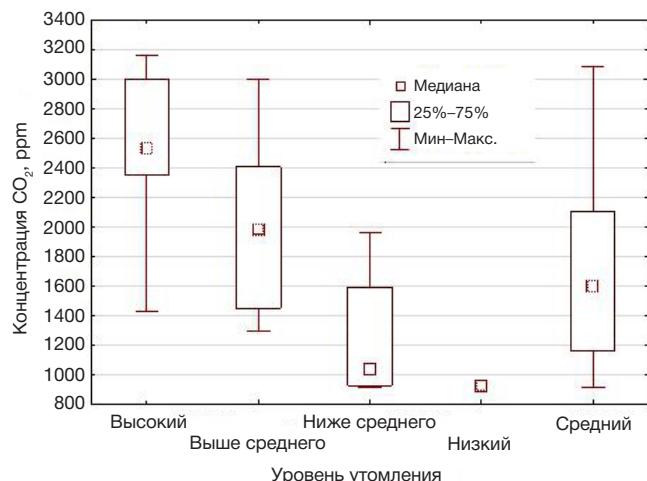


Рис. 6. Распределение групп учащихся по результатам оценки уровня утомления в зависимости от фактических концентраций углекислого газа за весь период мониторинга

дальнейшие контролируемые интервенционные исследования — например, с целенаправленной коррекцией параметров вентиляции и мониторингом более широкого спектра загрязнителей воздуха в помещении. Полученные результаты обосновывают необходимость такого мониторинга и разработки превентивных мер по оптимизации воздушной среды учебных помещений как важного компонента здоровьесберегающей образовательной среды.

ВЫВОДЫ

Непрерывная регистрация показателей температуры, относительной влажности воздуха и концентрации углекислого газа в учебных помещениях общеобразовательной организации выявила существенные отклонения от нормируемых параметров изучаемых показателей в динамике учебного дня. Более высокая температура в кабинете 2 (вторая смена) обусловлена прогревом помещения в течение всего дня за счет занятий в первой половине и дополнительным поступлением тепла от солнечной инсоляции во второй половине дня, в то время как кабинет 1, использовавшийся только в первую смену, не подвергался такому продолжительному тепловому воздействию. Более низкая относительная влажность в кабинете 2 согласуется с гипотезой о повышенной температуре и возможной недостаточной эффективности проветривания. Высокие и сопоставимые уровни концентрации углекислого газа в обоих кабинетах, достигающие значений, значительно превышающих гигиенический норматив, свидетельствуют о недостаточной эффективности регламентированного естественного проветривания для обеспечения необходимого воздухообмена при фактической наполняемости классов. Рост концентрации CO_2 ко второму-третьему уроку отражает типичное накопление антропогенных загрязнителей, а отсутствие системной разницы между кабинетами указывает на то, что применяемый профилактический режим проветривания является неэффективным для поддержания допустимых уровней CO_2 , независимо от времени проведения занятий. Таким образом, представленные параметры микроклимата и углекислого газа сформировались в условиях типовых учебных помещений с естественной вентиляцией и стандартным, но недостаточно эффективным режимом проветривания, а различия в температурно-влажностном

режиме связаны в первую очередь с разным временем использования кабинетов в течение суток и вытекающими из этого различиями теплового баланса, а не только с принадлежностью к той или иной учебной смене. Проведенный корреляционный анализ подтвердил взаимосвязь фактических показателей микроклимата и концентрации углекислого газа в учебных помещениях с изменением показателей когнитивных функций обучающихся. Установлено отрицательное влияние, в большей степени высоких концентраций углекислого газа, на снижение показателей эффективности умственной работоспособности, объема и точности кратковременной памяти, устойчивости

и концентрации внимания, избирательности и объема внимания со значимым увеличением доли обучающихся с высокой степенью утомления.

Полученные результаты позволили выявить причинно-следственные связи в системе «качественные и количественные показатели качества воздушной среды учебных помещений — фактическое функциональное состояние обучающихся», являющиеся основой для разработки системы оценки рисков и формирования программы профилактики отрицательных реакций со стороны функциональных систем организма обучающихся общеобразовательных организаций.

Литература

- Грицина О. П., Транковская Л. В., Семанин Е. В., Лисецкая Е. А. Факторы, формирующие здоровье современных детей и подростков. Тихоокеанский медицинский журнал. 2020; (3): 19–24.
- Федотова И. В., Трошин В. В., Черникова Е. Ф., Блинова Т. В., Потапова И. А. и др. Актуальные проблемы снижения риска школьно-обусловленных нарушений здоровья у современных школьников. В книге: Герасименко Н. Ф., Глыбочки П. В., Есауленко И. Э., Попов В. И., Стародубов В. И., Тутельян В. А., редакторы. Здоровье молодежи: новые вызовы и перспективы. М.: Научная книга, 2019; 48–67.
- Новикова И. И., Сорокина В. А., Лобкис М. А., Зубцовская Н. А., Семенихина М. В., Щевелева В. А. и др. Углекислый газ: проблемы нормирования, контроля и профилактики неблагоприятного воздействия в образовательных организациях (обзор литературы). Российский вестник гигиены. 2023; (4): 18–28.
- Kutsuruba B, Klinger DA, Hussain A. Relationships among school climate, school safety, and student achievement and well-being: a review of the literature. *Rev Educ.* 2015; 3 (2): 103–35. DOI: 10.1002/rev3.3043.
- Babich F, Torriani G, Corona J, Ibeas IL. Comparison of indoor air quality and thermal comfort standards and variations in exceedance for school buildings. *J Build Eng.* 2023; (71): 1–19. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106405.
- Jacobson TA, Kler JS, Hernke MT, Braun RK, Meyer KC, Funk WE. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nat Sustain.* 2019; 2 (8): 691–701. DOI: 10.1038/s41893-019-0323-1.
- Агафонова В. В. Оценка качества воздуха в помещении офисного здания. Водоснабжение и санитарная техника. 2019; (3): 61–4.
- Тельцова Л. З. Анализ состояния крови детей дошкольного возраста в зависимости от места проживания и уровня CO_2 в атмосферном воздухе. Эпоха науки. 2024; (38): 368–72.
- Губернский Ю. Д., Калинина Н. В., Гапонова Е. Б., Банин И. М. Обоснование допустимого уровня содержания диоксида углерода в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Гигиена и санитария. 2014; (6): 37–41.
- Pitarma R, Marques G, Ferreira BR. Monitoring indoor air quality for enhanced occupational health. *J Med Syst.* 2017; 41 (2): 23. DOI: 10.1007/s10916-016-0667-2.
- Sadrizadeh S, Yao R, Yuan F, Awbi H, Bahnfleth W, Bi Y, et al. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *J Build Eng.* 2022; (57): 104908. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104908.
- Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, Apte M. Associations between classroom CO_2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air.* 2004; 14 (5): 333–41. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x.
- Kolarik B, Andersen ZJ, Ibfelt T, Engelund EH, Møller E, Bräuner EV. Ventilation in day care centers and sick leave among nursery children. *Indoor Air.* 2016; 26 (2): 157–67. DOI: 10.1111/ina.12202.
- Агафонова В. В., Панферова Н. В., Финогенова О. Е., Агафонова А. Р. Исследование влияния концентрации углекислого газа в помещении классной комнаты на здоровье обучающихся. Энергосбережение и водоподготовка. 2022; 1 (135): 76–8.
- Пронина Т. Н., Карпович Н. В., Полянская Ю. Н. Уровень содержания углекислого газа в учебных помещениях и степень комфорта учащихся. Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья. 2015; (3): 32–5.
- Robertson DS. Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. *Current Science.* 2006; 90 (12): 1607–9.
- Капранов С. В., Капранова Г. В., Тарабцев Д. В., Соленая Е. С. Влияние микроклимата в помещениях пребывания школьников на их самочувствие. Экологический вестник Донбасса. 2022; (5): 5–14.
- Кулаков К. Ю., Егорова Е. М. Влияние изменений параметров микроклимата на самочувствие человека и эксплуатационные характеристики строительных конструкций. *E-Scio.* 2019; 5 (32): 248–54.
- Банникова Л. П., Себирзянов М. Д. Комплексная оценка влияния факторов окружающей среды, условий воспитания и обучения на течение процессов адаптации, состояние здоровья детей, посещающих дошкольные образовательные учреждения города. Непрерывное медицинское образование и наука. 2022; 17 (1): 8–13.
- Вансовская Л. И., Гайда В. К., Гербачевский В. К. Практикум по экспериментальной и прикладной психологии. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990; 125 с.
- Шапарь В. Б., Тимченко А. В., Швыдченко В. Н. Практическая психология. Инструментарий. Ростов-на-Дону: Феникс, 2002; 287 с.
- Артюхов А. А. «Система условных баллов» как прием оценивания знаний учащихся в ходе преподавания естественнонаучных дисциплин в общеобразовательной средней школе на примере географии. Международный научно-исследовательский журнал. 2024; 6 (144). URL: <https://research-journal.org/archive/6-144-2024-june/10.60797/IRJ.2024>. DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.87.
- Кореневская Е. И., Рогачевская Л. Г. Гигиенические вопросы строительства школьных зданий. М.: Медицина, 1974; 224 с.
- Воронова Б. З., Эльковская Е. А. Изменение умственной работоспособности и некоторых показателей функционального состояния центральной нервной системы младших школьников в различных условиях воздушной среды. Гигиена и санитария. 1982; (9): 44–7.
- Ikeda N, Takahashi H, Umetsu K, Suzuki T. The course of respiration and circulation in death by carbon dioxide poisoning. *Forensic Sci Int.* 1989; 41 (1): 93–9.
- Kajtar L, Herczeg L, Lang E. Examination of CO_2 by scientific methods in the laboratory. *Healthy Buildings.* 2003; (3): 176–81.
- Kajtar L, Herczeg L, Lang E. Influence of carbon dioxide pollutant on human wellbeing and work intensity. *Healthy Buildings.* 2006; (1): 85–90.
- Гурин И. В. Проблемы микроклимата помещений. Сантехника, отопление, кондиционирование. 2011; (11): 72–5.

29. Pang L, Zhang J, Cao X, Wang X, Liang J, Zhang L, et al. The effects of carbon dioxide exposure concentrations on human

vigilance and sentiment in an enclosed workplace environment. *Indoor Air*. 2021; 31 (2): 467–79. DOI: 10.1111/ina.12746.

References

1. Gricina OP, Trankovskaja LV, Semaniv EV, Liseckaja EA. Faktory, formirujushchie zedorov'e sovremennoy detej i podrostkov. *Tihookeanskij medicinskij zhurnal*. 2020; (3): 19–24 (in Rus.).
2. Fedotova IV, Troshin VV, Chernikova EF, Blinova TV, Potapova IA, et al. Aktual'nye problemy snizhenija riska shkol'no-obuslovlennyh narushenij zedorov'ja u sovremennoy shkol'nikov. V knige: Gerasimenko NF, Glybochko PV, Esaulenko IJe, Popov VI, Starodubov VI, Tuteljan VA, redaktory. *Zedorov'e molodezhi: novye vyzovy i perspektivy*. M.: Nauchnaja kniga, 2019; 48–67 (in Rus.).
3. Novikova II, Sorokina AV, Lobkis MA, Zubtsovskaya NA, Semenikhina MV, Shcheveleva VA, et al. Carbon dioxide: problems of standard setting, content control and prevention of adverse effects in educational institutions. *Russian Bulletin of Hygiene*. 2023; (4): 16–25.
4. Kutsyuruba B, Klinger DA, Hussain A. Relationships among school climate, school safety, and student achievement and well-being: a review of the literature. *Rev Educ*. 2015; 3 (2): 103–35. DOI: 10.1002/rev3.3043.
5. Babich F, Torriani G, Corona J, Ibeas IL. Comparison of indoor air quality and thermal comfort standards and variations in exceedance for school buildings. *J Build Eng*. 2023; (71): 1–19. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106405.
6. Jacobson TA, Kler JS, Henke MT, Braun RK, Meyer KC, Funk WE. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nat Sustain*. 2019; 2 (8): 691–701. DOI: 10.1038/s41893-019-0323-1.
7. Agafonova VV. Ocenna kachestva vozduha v pomeshchenii ofisnogo zdaniya. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tekhnika*. 2019; (3): 61–4 (in Rus.).
8. Telcova LZ. Analiz sostojaniya krovi detej doshkol'nogo vozrasta v zavisimosti ot mesta prozhivaniya i urovnya CO₂ v atmosfernom vozduhe. *Jepoha nauki*. 2024; (38): 368–72 (in Rus.).
9. Gubernskij JuD, Kalinina NV, Gaponova EB, Banin IM. Obosnovanie dopustimogo urovnya soderzhanija dioksida ugleroda v vozduhe pomeshchenij zhilyh i obshhestvennyh zdaniy. *Gigiena i sanitarija*. 2014; (6): 37–41 (in Rus.).
10. Pitarma R, Marques G, Ferreira BR. Monitoring indoor air quality for enhanced occupational health. *J Med Syst*. 2017; 41 (2): 23. DOI: 10.1007/s10916-016-0667-2.
11. Sadrizadeh S, Yao R, Yuan F, Awbi H, Bahnfleth W, Bi Y, et al. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *J Build Eng*. 2022; (57): 104908. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104908.
12. Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, Apte M. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*. 2004; 14 (5): 333–41. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x.
13. Kolarik B, Andersen ZJ, Ibfelt T, Engelund EH, Møller E, Bräuner EV. Ventilation in day care centers and sick leave among nursery children. *Indoor Air*. 2016; 26 (2): 157–67. DOI: 10.1111/ina.12202.
14. Agafonova VV, Panferova NV, Finogenova OE, Agafonova AR. Issledovanie vlijanija koncentracii uglekislogo gaza v pomeshchenii klassnoj komnaty na zedorov'e obuchajushhihsja. *Jenergosberezenie i vodopodgotovka*. 2022; 1 (135): 76–8 (in Rus.).
15. Pronina TN, Karpovich NV, Poljanskaja JuN. Uroven' soderzhanija uglekislogo gaza u uchebnyh pomeshchenijah i stepen' komforta uchashchihsja. *Voprosy shkol'noj i universitetskoj mediciny i zedorov'ja*. 2015; (3): 32–5 (in Rus.).
16. Robertson DS. Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. *Current Science*. 2006; 90 (12): 1607–9.
17. Kapranov SV, Kapranova GV, Tarabcev DV, Solenaja ES. *Vlijanie mikroklimata v pomeshchenijah prebyvaniya shkol'nikov na ih samochuvstvie*. *Jekologicheskij vestnik Donbassa*. 2022; (5): 5–14 (in Rus.).
18. Kulakov KJu, Egorova EM. *Vlijanie izmenenij parametrov mikroklimata na samochuvstvie cheloveka i jeksploatacionnye harakteristiki stroitel'nyh konstrukcij*. *E-Scio*. 2019; 5 (32): 248–54 (in Rus.).
19. Bannikova LP, Sebirjanov MD. *Kompleksnaja ocenka vlijanija faktorov okruzhajushhej sredy, uslovij vospitanija i obuchenija na techenie processov adaptacii, sostojanie zedorov'ja detej, poseshhajushhih doshkol'nye obrazovatel'nye uchrezhdenija goroda. Nepreryvnoe medicinskoe obrazovanie i nauka*. 2022; 17 (1): 8–13 (in Rus.).
20. Vansovskaja LI, Gajda VK, Gerbachevskij VK. *Praktikum po jeksperimental'noj i prikladnoj psihologii*. L.: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1990; 125 p. (in Rus.).
21. Shapar VB, Timchenko AV, Shvydchenko VN. *Prakticheskaja psihologija. Instrumentarij*. Rostov-na-Donu: Feniks, 2002; 287 p. (in Rus.).
22. Artjuhov AA. "Sistema uslovnyh ballov" kak priem ocenivaniya znanij uchashchihsja v hode prepodavaniya estestvenno-nauchnyh disciplin v obshheobrazovatel'noj srednej shkole na primere geografii. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2024; 6 (144). (In Rus.). Available from: <https://research-journal.org/archive/6-144-2024-june/10.60797/IRJ.2024>. DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.87.
23. Korenevskaja EI, Rogachevskaja LG. *Gigienicheskie voprosy stroitel'stva shkol'nyh zdanij*. M.: Medicina, 1974; 224 p. (in Rus.).
24. Voronova BZ, Jelkovskaja EA. *Izmenenie umstvennoj rabotosposobnosti i nekotoryh pokazatelej funkcion'nogo sostojaniya central'noj nervnoj sistemy mladshih shkol'nikov v razlichnyh uslovijah vozdushnoj sredy*. *Gigiena i sanitarija*. 1982; (9): 44–7 (in Rus.).
25. Ikeda N, Takahashi H, Umetsu K, Suzuki T. The course of respiration and circulation in death by carbon dioxide poisoning. *Forensic Sci Int*. 1989; 41 (1): 93–9.
26. Kajtar L, Herczeg L, Lang E. Examination of CO₂ by scientific methods in the laboratory. *Healthy Buildings*. 2003; (3): 176–81.
27. Kajtar L, Herczeg L, Lang E. Influence of carbon dioxide pollutant on human wellbeing and work intensity. *Healthy Buildings*. 2006; (1): 85–90.
28. Gurin IV. *Problemy mikroklimata pomeshchenij*. Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie. 2011; (11): 72–5 (in Rus.).
29. Pang L, Zhang J, Cao X, Wang X, Liang J, Zhang L, et al. The effects of carbon dioxide exposure concentrations on human vigilance and sentiment in an enclosed workplace environment. *Indoor Air*. 2021; 31 (2): 467–79. DOI: 10.1111/ina.12746.