

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА НА ПОГРУЖЕНИЕ В ХОЛОДНУЮ ВОДУ

Т. И. Баранова¹, Т. В. Рыбьякова², М. О. Дмитриева¹, Д. А. Анисимов¹, М. С. Тарасова³, М. Г. Оганнисян³✉¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия² Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П. Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург, Россия³ Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

Зимнее плавание отличается экстремальной холодовой нагрузкой, которая может вызывать нарушение дыхания, аритмии, повышение АД (артериального давления) даже у почти здоровых людей. Спортсменам зимнего плавания необходимы дополнительные критерии допуска к тренировкам, оценивающие реакцию сердечно-сосудистой системы (ССС) на холодную воду. Целью исследования было определить риск патологических отклонений у обследованных с различной реактивностью ССС на погружение в холодную воду. Реактивность ССС оценивали посредством пробы холодо-гипоксического воздействия (ХГВ) по разработанному ранее алгоритму. Проанализированы реакция ССС на пробу ХГВ и данные после заплывов в холодной воде. В лаборатории обследованы практически здоровые 255 женщины и 205 мужчин 18–25 лет. ЭКГ регистрировали на кардиоанализаторе «Поли-Спектр-8/Е». Для статистического анализа использовали пакет GraphPad Prism 8 для Windows 10. Установлено: при ХГВ у высокореактивных и реактивных обследованных удлиняется PQ-интервал: в исходном состоянии (ИС) $158 \pm 7,2$, при ХГВ — $178 \pm 9,1$ ($p < 0,01$); у испытуемых парадоксального типа при ХГВ на фоне увеличения ЧСС наблюдали увеличение QTc — в ИС $405 \pm 7,1$, при ХГВ — $420 \pm 7,5$ ($p < 0,05$). При ХГВ относительно ИС в среднем АД повышалось — САД на $17,4 \pm 4,3$ мм рт. ст., ДАД на $12,9 \pm 3,1$ мм рт. ст. ($p < 0,05$). При заплывах в холодной воде у адаптированных к холоду пловцов в 50% случаев QTc превышал норму, например, в ИС QTc — 434 ± 24 , после заплыва — 492 ± 25 с. После заплыва на 200 м при $t = 1,5-2$ °C в среднем по группе АД повышалось по сравнению с ИС САД на $16,9 \pm 3,1$ мм рт. ст., ДАД на $12,3 \pm 2,3$ мм рт. ст. ($p < 0,05$). Проанализировав данные, пришли к выводу — на основе пробы ХГВ можно разработать специфические критерии допуска к занятиям холодновым плаванием.

Ключевые слова: зимнее плавание, дыхательная система, сердечно-сосудистая система, автономная регуляция, сердечные аритмии, внутрисердечное проведение, периферический вазоспазм, гипертензивный ответ

Финансирование: исследование проведено в рамках выполнения своих трудовых обязанностей по заданию СПбГУ.

Вклад авторов: Т. И. Баранова — разработка концепции статьи, написание текста, общее редактирование; Т. В. Рыбьякова — разработка концепции статьи, общее редактирование; М. О. Дмитриева — поиск и анализ источников, статистическая обработка данных; Д. А. Анисимов — поиск и анализ источников, составление таблиц, подготовка рисунков; М. С. Тарасова — поиск и анализ источников, написание текста; М. Г. Оганнисян — определение подходов к математическому моделированию и их оптимизация.

Соблюдение этических стандартов: исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией и одобрено этическим комитетом СПбГУ (протокол № 40 от 07 марта 2012 г.). Все испытуемые подписали добровольное информированное согласие на участие в исследовании.

✉ **Для корреспонденции:** Мкртыч Гагикович Оганнисян
ул. Б. Дорогомилловская, д. 5, г. Москва, 121059, Россия; ogannisyanmg@sportfmba.ru

Статья получена: 17.10.2023 **Статья принята к печати:** 30.11.2023 **Опубликована онлайн:** 26.12.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.053

SPECIFICS OF REACTION OF HUMAN CARDIOVASCULAR SYSTEM TO IMMERSION IN COLD WATER

Baranova TI¹, Rybyakova TV², Dmitrieva MO¹, Anisimov DA¹, Tarasova MS³, Ogannisyan MG³✉¹ Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia² Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health, St. Petersburg, Russia³ Federal Research and Clinical Center for Sports Medicine and Rehabilitation of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

Winter swimming implies extreme cold stress, which can cause respiratory disorders, arrhythmias, and elevated blood pressure even in generally healthy people. Pre-training examinations for athletes practicing winter swimming should include additional criteria evaluating reaction of the cardiovascular system (CVS) to cold water. This study aimed to determine the risk of pathological abnormalities in the examined individuals exhibiting different CVS reactions to immersion in cold water. We assessed reactivity of CVS with the help of a cold-hypoxic test (CHT), following a previously developed algorithm. The subjects of the analysis were CVS reactions to CHT and physical data collected after swimming in cold water. The study involved 255 female and 205 male participants, all of them almost healthy, aged 18–25 years. They participated in testing in a laboratory setting. Poly-Spekt-8/E cardiograph was used to record ECGs, and GraphPad Prism 8 package for Windows 10 for statistical analysis. Findings: in highly reactive and reactive participants, CHT causes lengthening of the PQ interval, with its value in the initial state (IS) equal to 158 ± 7.2 , and with CHT — 178 ± 9.1 ($p < 0.01$); in subjects of the paradoxical type, CHT, against the background of higher pulse, triggered increase of QTc, which in the IS was 405 ± 7.1 , with CHT — 420 ± 7.5 ($p < 0.05$). As for blood pressure, on average, CHT made it grow, SBD by 17.4 ± 4.3 mmHg, DBP by 12.9 ± 3.1 mmHg ($p < 0.05$). Swimmers adapted to cold, when swimming in cold water, had QTc above normal in 50% of cases: e.g., if IS of QTc was 434 ± 24 s, after swimming it increased to 492 ± 25 s. After a 200 m swim at $t = 1.5-2$ °C, the average blood pressure in the group, compared to IS, increased, with SBD growing by 16.9 ± 3.1 mmHg, and DBP — by 12.3 ± 2.3 mmHg ($p < 0.05$). Having analyzed the data, we conclude that CHT can be the basis of additional criteria extending examinations for athletes seeking admittance to cold water swimming.

Keywords: winter swimming, respiratory system, cardiovascular system, autonomic regulation, cardiac arrhythmias, intracardiac conduction, peripheral vasospasm, hypertension

Funding: the study was conducted as part of discharging work duties at the St. Petersburg State University.

Author contribution: Baranova TI — article conceptualization, authoring, general editing; Rybyakova TV — article conceptualization, general editing; Dmitrieva MO — search for and analysis of sources, statistical data processing; Anisimov DA — search for and analysis of sources, compilation of tables, preparation of figures; Tarasova MS — search for and analysis of sources, article authoring; Ogannisyan MG — selection of approaches to mathematical modeling and their optimization.

Compliance with the ethical standards: the study was conducted in accordance with the Helsinki Declaration and approved by the Human Research Ethics Committee (Minutes #40 of March 07, 2012). All subjects were familiarized with the test protocol and signed an agreement to participate therein.

✉ **Correspondence should be addressed:** Mkrtych G. Ogannisyan
B. Dorogomilovskaya, 5, Moscow, 121059, Russia; ogannisyanmg@sportfmba.ru

Received: 17.10.2023 **Accepted:** 30.11.2023 **Published online:** 26.12.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.053

В 2022 г. зимнее плавание было включено во Всероссийский реестр видов спорта. Этот вид спортивной деятельности характеризуется экстремальной холодовой нагрузкой на организм, поэтому существенно отличается от классического плавания и от плавания в открытой воде. Мощное холодовое воздействие на организм спортсмена предъявляет высокие требования к уровню его функциональных резервов, и, следовательно, определяет важность и необходимость их оценки и контроля.

При погружении в холодную воду без специальной экипировки у человека работают два механизма для поддержания постоянной температуры ядра тела: увеличение организмом теплопродукции и снижение теплоотдачи [1, 2]. При этом активируются рефлекторные механизмы защиты. Под контролем симпатико-адренергических влияний происходит спазм периферических сосудов, снижение кожного кровотока и кровотока поверхностных мышц, что ограничивает теплопотери организма, наблюдается выброс глюкозы из печени, мобилизуются жирные кислоты из жировых депо, активируется теплопродукция в бежевой жировой ткани [3–5]. Одновременно с этим погружением в воду лица реализуется также нырятельный рефлекс, обеспечивающий кислород-сберегающий эффект. При этом увеличиваются парасимпатические влияния от холодовых рецепторов (преимущественно кожи лица) по холинергическому тракту блуждающего нерва на синусовый узел сердца. Происходит замедление сердечного ритма, реализуется так называемый «diving reflex», обладающий сильным аритмогенным эффектом [6–8]. При усилении холинергических влияний на воздухоносные пути может происходить сужение бронхов, что влечет за собой риск нарушения вентиляции легких [9].

При этом следует отметить, что плавание в холодной и ледяной воде весьма распространено и не всегда сопровождается неблагоприятными реакциями сердечно-сосудистой системы [10]. Мы полагаем, что причиной негативных реакций организма, угрожающих жизни человека при погружении в холодную воду, может быть высокая реактивность эфферентного звена рефлекторных реакций. Эта чрезмерная реактивность может быть обусловлена несколькими факторами, например, у «новичков» — неадаптированностью организма к экстремальному холодовому воздействию. Вместе с тем это может быть вызвано особенностями вегетативной регуляции, сформировавшимися в постнатальном развитии, а также генетическими особенностями индивида [11–15].

Данная статья представляет собой анализ полученных нами ранее результатов исследований, посвященных влиянию холодной воды на проявление адаптивных рефлекторных реакций, и обнаружение на основе этого анализа лиц, попадающих в группу риска негативного ответа сердечно-сосудистой системы на холодовую водную иммерсию, угрожающего жизни и здоровью человека.

Цель работы состояла в определении характера адаптивных сердечно-сосудистых реакций и возможности патологических отклонений у обследованных, обладающих различной реактивностью вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы на холодо-гипоксическое воздействие (ХГВ) и водную холодовую иммерсию во время заплывов в открытой воде.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Обобщены два направления проведенных исследований — лабораторные и полевые. В первой серии представлены

материалы лабораторных исследований реализации нырятельного рефлекса при погружении лица в холодную воду — ХГВ. Дана оценка аритмогенности нырятельного рефлекса у людей, отличавшихся реактивностью сердечно-сосудистой системы на холодовой раздражитель.

Во второй серии представлены результаты полевых исследований эстафетных и соревновательных заплывов в воде разной температуры (+7–9 °С, +16–17 °С и +1,5–2,5 °С). Дана оценка реакции сердечно-сосудистой системы на заплывы в холодной воде: проанализирована проводимость миокарда, артериальное давление (АД) и частота сердечных сокращений (ЧСС).

Исследование проведено в период 2008–2023 гг. на базе Санкт-Петербургского университета, в научно-исследовательской лаборатории системных адаптаций. Обследованы практически здоровые люди — 205 мужчин, 255 женщин в возрасте 18–25 лет. Критерии включения: отсутствие выраженных отклонений в работе сердечно-сосудистой системы. Критерии исключения: наличие в анамнезе следующих патологических отклонений: синдром слабости синусового узла, гипертония II степени, мерцательная аритмия.

Опрос выявил среди обследуемых 15% курящих со стажем курения в среднем 4,3 ± 1,7 года. Всех обследуемых, как правило, просили за 2 ч до исследования не курить и не пить кофе. Исследование обычно проходило утром с 10 до 12 ч.

Лабораторная модель исследования

При проведении исследования испытуемые находились на кушетке, лежа на животе лицом вниз, в максимально расслабленном состоянии. Пробу, имитирующую ныряние, осуществляли, погружая лицо в воду. Температура воды составляла $+10 \pm 2,2$ °С, температура воздуха $+21 \pm 2,3$ °С. Как правило, погружение лица в воду совершали 3 раза на нефорсированном выдохе. Гипервентиляция перед погружением не допускалась. Период отдыха между погружениями составлял 2 мин. За это время пульс, как правило, восстанавливался до исходной величины. Задержка дыхания при первом погружении длилась до ощущения дискомфорта. Следующие за ней погружения проводили на волевом усилии до максимума.

Перед погружением, при погружении и после него (в процессе восстановления) для оценки реакций сердечно-сосудистой системы использовали методы электрокардиографии (ЭКГ), фотоплетизмографии (ФПГ) и непрерывной регистрации АД. Кровенаполнение периферических сосудов косвенно определяли по амплитуде систолической волны в фалангах пальцев кисти (АСВ, pm), о тунусе сосудов судили по времени распространения систолической волны (ВГРВ, с). Для записи и анализа ФПГ использовали программно-диагностический комплекс — реограф-полианализатор РГПА-6/12 «РЕАН-ПОЛИ», модификация 03, версия «Элитная» («Медиком-МТД»; Россия). Непрерывное артериальное давление регистрировали прибором Finometer® MIDI (Finapres Medical Systems; Нидерланды). ЭКГ регистрировали посредством кардиоанализатора поли-спектр-8/Е («Нейрософт»; Москва).

Для описания характера хронотропной функции сердца во время выполнения пробы ХГВ использовали следующие показатели: латентное время развития рефлекторного брадикардии — I (с), время появления максимального кардиоинтервала во время пробы — tmax (с), скорость

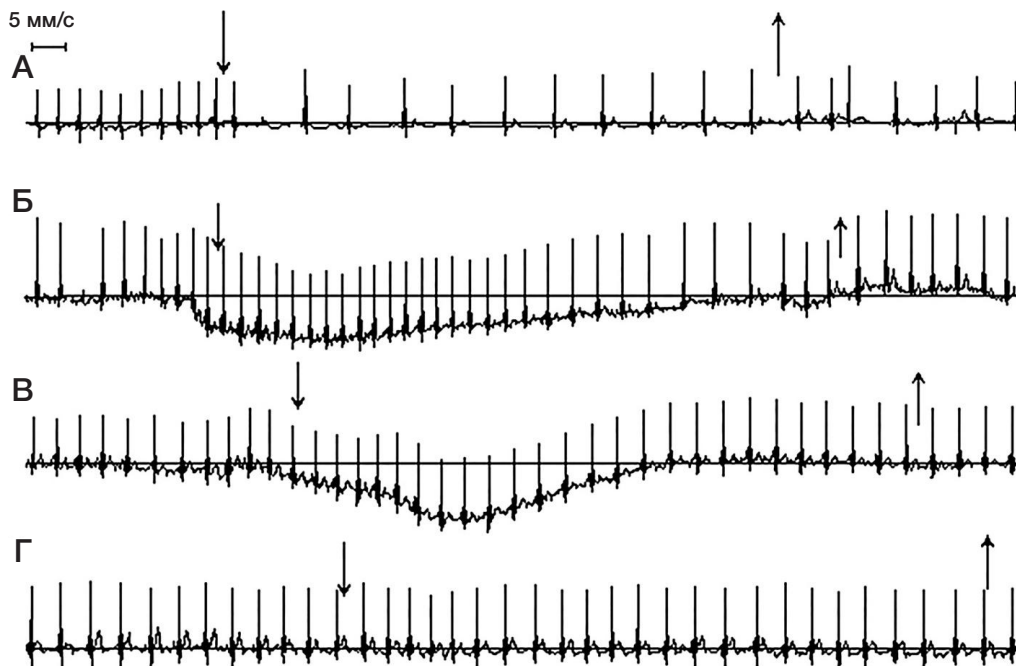


Рис. 1. Типы реагирования сердечно-сосудистой системы на погружение лица в воду (типы нырятельной реакции): высокореактивный (А), реактивный (Б), ареактивный (В), парадоксальный (Г). Стрелка вниз — погружение, стрелка вверх — прекращение погружения лица в воду

нарастания брадикардии – V, выраженность брадикардии — В. Б. Подробно методика определения типов описана в ранних исследованиях [16]. На основании этих показателей выделяли четыре типа реагирования: высокореактивный, реактивный, ареактивный и парадоксальный (рис. 1).

Для статистического анализа использовали пакет GraphPad Prism 8 для Windows 10. Значимость различий для несвязанных переменных и связанных между собой парных рядов оценивали с использованием непараметрических критериев Манна–Уитни и Краскела–Уоллиса. Для оценки значимости различий в выборках с нормальным распределением использовали *t*-критерий Стьюдента и one-way ANOVA. Статистически значимым считали уровень *P*-values < 0,05. В малых группах статистическую

значимость изменений определяли индивидуально для каждого человека «до — после» заплыва. Длительность записи ЭКГ при этом составляла 5 мин. После проверки на нормальность распределения применяли *t*-критерий Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ реакции сердечно-сосудистой системы на пробу ХГВ выявил рефлекторное замедление сердечного ритма, сужение периферических сосудов (рис. 2, 3; табл.1) и повышение уровня АД (рис. 2; табл.1).

В первой серии лабораторных исследований (обследовано 460 человек) была изучена хронотропная

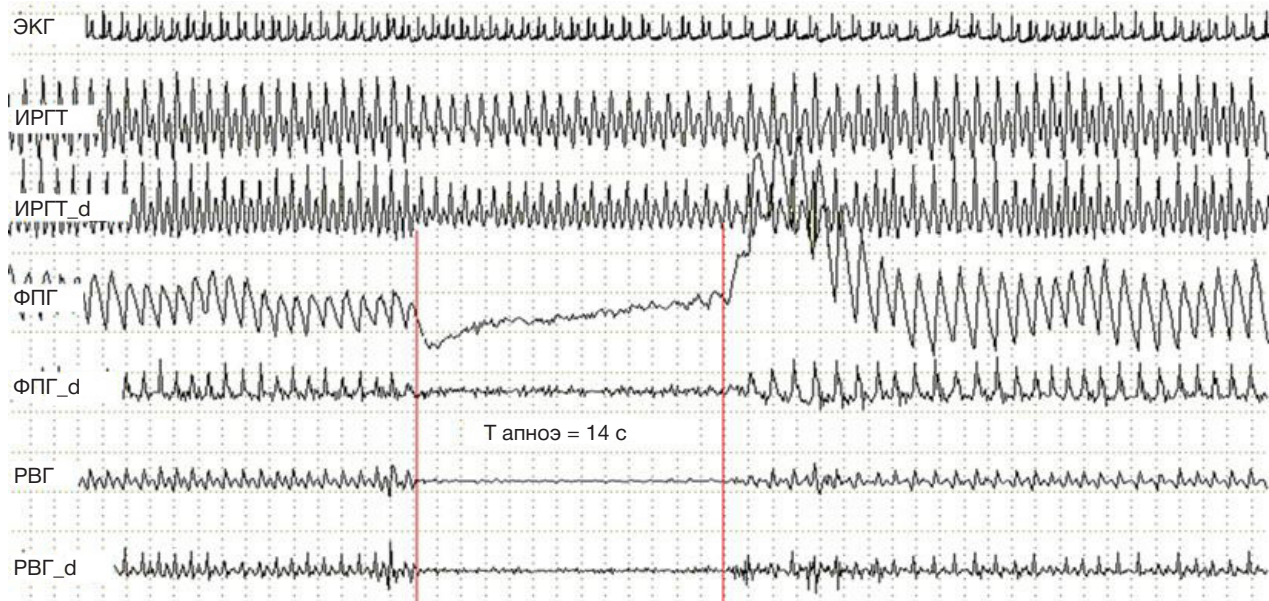


Рис. 2. Изменение характеристик сердечно-сосудистой системы во время пробы ХГВ. ЭКГ — электрокардиограмма, ИРГТ — интегральная реограмма по Тищенко, ИРГТd — дифференциальная кривая пульсовой волны ИРГТ, ФПГ — фотоплетизмограмма дистальной фаланги большого пальца кисти, ФПГd — дифференциальная кривая пульсовой волны ФПГ, РВПГ — реоплетизмограмма плеча, РВПГd — дифференциальная кривая пульсовой волны РВПГ. Вертикальные линии — начало и конец пробы с погружением лица в воду

Таблица 1. Изменение характеристик сердечно-сосудистой системы в состоянии покоя и при имитации ныряния у мужчин и женщин ($n = 80$)

Показатели	ЧСС, уд/мин	ДАД, мм рт. ст.	САД, мм рт. ст.	АСВ, pm	ВРПВ, мс
В состоянии покоя	64,8 ± 3,2	71,2 ± 5,8	113,8 ± 6,2	1,67 ± 0,91	217 ± 11,1
Проба ХГВ	55,5 ± 3,8*	84,1 ± 7,3*	130 ± 10,1*	0,35 ± 0,20**	199 ± 20,5*
Восстановление	63,5 ± 2,3	76,5 ± 5,1	121,1 ± 7,1	0,36 ± 0,19**	195,8 ± 15,3*

Примечания: САД — систолическое давление, ДАД — диастолическое давление, АСВ — амплитуда пульсовой волны фотоплетизмограммы, ВРПВ — время распространения пульсовой волны. * — $p < 0,05$; ** — $p < 0,01$ — при сравнении показателей во время пробы ХГВ с состоянием исходного покоя.

реакция сердца на ХГВ. В соответствии с проявлением и скоростью нарастания рефлекторной брадикардии (один из рефлексов нырятельного ответа) при ХГВ обследованные были подразделены на четыре типа по разработанной нами ранее методике [16]. Выявили следующее соотношение: высокорезактивным типом характеризовались 40%, реактивным — 45%, ареактивным — 10% и парадоксальным — 5% участников эксперимента. Деление испытуемых на типы, обладающих различной реактивностью парасимпатического ответа сердечно-сосудистой системы на ХГВ, было необходимо для того, чтобы понять, влияет ли она на формирование сердечных аритмий, и, напротив, какие отклонения от нормы могут формироваться у обследованных с преобладанием симпатических влияний (парадоксальные). Сделать это было необходимо, для того чтобы оценить возможность риска патологических отклонений у людей, характеризующихся разной выраженностью рефлекторных парасимпатических и симпатических влияний на миокард при погружении в холодную воду.

Анализ проводимости миокарда при выполнении пробы ХГВ у представителей с различными типами реагирования

Анализ динамики показателей проводимости миокарда на пробу ХГВ выявил, что у представителей высокорезактивного и реактивного типов при рефлекторном усилении парасимпатических влияний не только происходит замедление ЧСС (статистически значимые увеличения RR-интервалов), но меняется также и скорость предсердно-желудочкового проведения — увеличиваются PQ-интервалы. Замедление внутри предсердного проведения при пробе ХГВ (удлинение PQ-интервала) наблюдали у большинства представителей этих групп, но, как правило, длительность PQ-интервала при этом находилась в пределах нормы. Вместе с тем у двух представителей высокорезактивного типа и трех — из группы реактивных длительность PQ-интервала превышала норму, что говорит о задержке проведения импульса и частичной атриоventрикулярной блокаде (табл. 2).

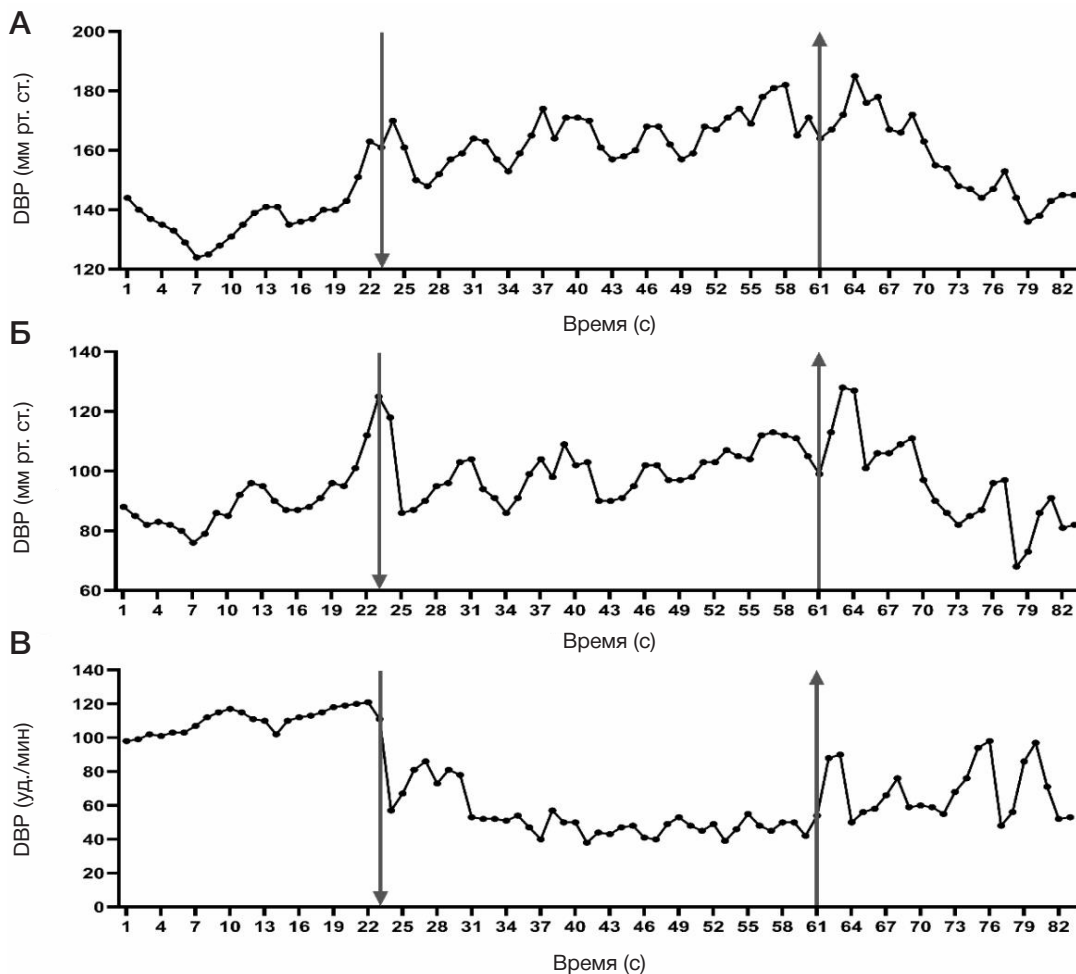


Рис. 3. Динамика артериального давления: систолического (SBP) (А), диастолического (DBP) (Б), сердечного ритма (HR) у исп. А. Д. (В). Стрелка вниз — начало пробы, стрелка вверх — окончание пробы ХГВ

Таблица 2. Временные показатели ЭКГ в состоянии покоя и во время пробы ХГВ у представителей различных типов реагирования

Показатели	Длительность интервалов кардиоцикла, мс						
	RR ср.	P	PQ	QRS	QT	QTc	TP
Высокореактивный тип (n = 18)							
В состоянии покоя	1052 ± 22,7	98 ± 6,2	158 ± 3,9	97 ± 10,4	383 ± 6,7	418 ± 7,3	512 ± 20,2
При ХГВ	1466 ± 25,4**	99 ± 8,0	167 ± 4,1*	106 ± 8,6	403 ± 7,9	376 ± 11,3	906 ± 19,9**
Реактивный тип (n = 23)							
В состоянии покоя	1145 ± 31,8	96 ± 3,0	158 ± 7,2	106 ± 8,0	404 ± 10,4	432 ± 14,8	584 ± 23,3
При ХГВ	1371 ± 30,9**	113 ± 8,3*	178 ± 9,1**	110 ± 9,1	411 ± 19,0	414 ± 15,0	796 ± 25,8**
Ареактивный тип (n = 24)							
В состоянии покоя	1066 ± 29,5	96 ± 7,0	149 ± 11,0	107 ± 9,1	392 ± 12,6	425 ± 11,0	525 ± 19,4
При ХГВ	1063 ± 25,4	94 ± 8,3	151 ± 10,0	101 ± 10,5	388 ± 11,0	409 ± 8,4	524 ± 18,1
Парадоксальный тип (n = 15)							
В состоянии покоя	1245 ± 37,0	97 ± 7,6	152 ± 6,2	97 ± 6,1	406 ± 8,3	405 ± 7,1	687 ± 18,9
При ХГВ	1056 ± 22,6**	95 ± 8,7	150 ± 5,5	95 ± 5,8	387 ± 10,2*	420 ± 7,5*	523 ± 13,5**

Примечания: достоверность различий между исходным состоянием и во время пробы ХГВ. * — $p < 0,05$, ** — $p < 0,01$.

У представителей ареактивного типа значимых изменений при пробе ХГВ не обнаружено (табл. 4). У представителей парадоксального типа во время пробы ХГВ отмечено на фоне уменьшения RR-, TP-, QT-интервалов увеличение QTc показателя, т. е. на фоне увеличения ЧСС наблюдается замедление внутри желудочкового проведения (табл. 2).

Анализ динамики АД при применении проб ХГВ показал достоверное повышение уровней САД и ДАД у всех обследованных (рис. 4, 5). Выявлено, что в исходном состоянии АД выше у представителей высокореактивного типа. Самое низкое САД наблюдали у обследованных парадоксального типа. При этом у представителей высокореактивного типа при повторных применениях проб ХГВ ДАД прогрессивно продолжало нарастать, достигая у некоторых из них 175/115 мм рт. ст.

Таким образом, у большинства обследованных с умеренной реактивностью ХГВ вызывает рефлекторные изменения адаптивного характера, но у некоторых испытуемых с высокой реактивностью может провоцировать атриовентрикулярную блокаду, вызывать

замедление внутри желудочкового проведения (у части парадоксальных), на фоне периферического вазоспазма провоцирует повышение АД. Данные факты обнаружены нами на пробу ХГВ, которая проводится в комфортных условиях с минимумом напряжения. Но в условиях полной холодной иммерсии на фоне холодного стресса эти отклонения могут приобретать фатальный характер.

Влияние холодо-гипоксической тренировки на реактивность сердечно-сосудистой системы

Для выяснения влияния адаптации к ХГВ на реактивность вегетативной регуляции провели шестинедельный курс ежедневной тренировки. После тестирования и определения типа реагирования на пробу ХГВ отобрали 40 человек (по 10 человек каждого типа). Тренировку повторяли ежедневно в течение 6 недель, проводя серию из 3–4 погружений на задержанном нефорсированном выдохе лица в воду с температурой $+8 \pm 2$ °С. После тренировки повторное тестирование показало снижение реактивности, главным образом отразившееся на

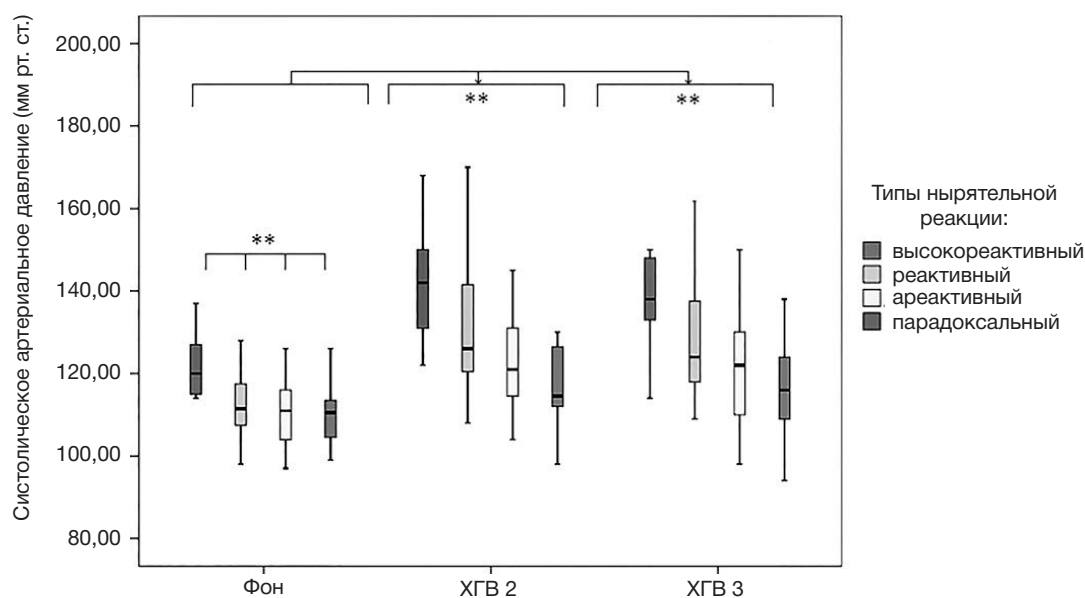


Рис. 4. Изменения уровня систолического давления под влиянием пробы ХГВ. По оси абсцисс: фон — состояние покоя, лежа на животе; ХГВ2 — вторая проба; ХГВ3 — третья проба с погружением лица в холодную воду. ** — $p < 0,01$, значимость различий. Высокореактивный тип — $n = 18$; реактивный — $n = 23$; ареактивный — $n = 24$; парадоксальный — $n = 15$

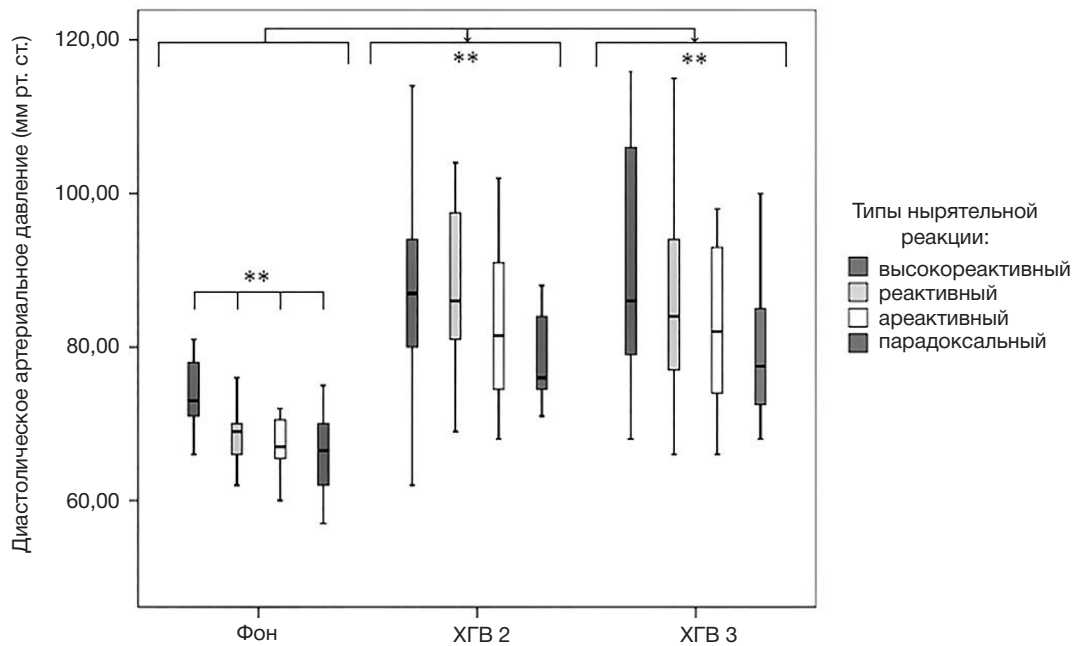


Рис. 5. Изменение уровня диастолического давления под влиянием пробы ХГВ. При втором (ХГВ2) и третьем (ХГВ3) погружениях. Остальные обозначения как на рис. 5. ** — $p < 0,01$. Высокореактивный тип — $n = 18$; реактивный — $n = 23$; ареактивный — $n = 24$; парадоксальный — $n = 15$

увеличении латентного времени развития рефлекторной брадикардии и замедлении скорости ее нарастания при проведении пробы ХГВ. При этом семь человек из группы высокорезактивных перешли в реактивные, но три человека сохранили высокую реактивность. Четыре человека из группы реактивных перешли в группу ареактивных, два человека из парадоксальных — в группу ареактивных, а три человека — в группу реактивных, один не изменил тип реагирования.

Анализ рефлекторной констрикции периферических сосудов и динамики АД также показали снижение реактивности под воздействием тренировки, что отразилось в менее выраженном повышении уровня ДАД при ХГВ. САД во время ХГВ, напротив, после тренировки достоверно увеличилось (табл. 3). При этом увеличилось и пульсовое давление, а следовательно, и ударный объем желудочка.

Таким образом, в процессе адаптации к холодо-гипоксическому воздействию реактивность сердечно-сосудистой системы несколько снижается. Но вместе с тем выявлены люди, не изменившие реактивность под воздействием тренировки, что может быть связано с их индивидуальными особенностями, в том числе генетическими [12–14].

Изменение проводимости миокарда под влиянием заплывов в открытой холодной воде

Проанализировано состояние сердечно-сосудистой системы после двух эстафетных заплывов. Первый заплыв

«Елагин остров — Кронштадт» проходил 20 октября 2019 г. при температуре воды $+7,5-9$ °С. Дистанция составила 25 км. В эстафете участвовали четверо опытных пловцов зимнего плавания (возраст 37–52 года). В соответствии с правилами Международной ассоциации зимнего плавания (IWSA), участники плыли без гидрокостюмов. Длительность индивидуальных заплывов составляла 20 мин. Отдых между заплывами составлял 60 мин.

Запись ЭКГ проводили за 30 мин до заплыва и на 30-й минуте восстановления после заплывов. Под влиянием холодного фактора и физической нагрузки у двух из четырех спортсменов наблюдали статистически значимое, выходящее за пределы нормы увеличение QTc-интервала — замедление внутри желудочкового проведения (табл. 4).

Вторая эстафета проходила на участке «Орешек — Кронштадт» 12–13 июня 2021 г. В заплывах участвовали те же пловцы. Они преодолели дистанцию 103 км за 22 ч 16 мин. Температура воздуха менялась в диапазоне $+16-22,3$ °С. Температура воды в Неве и Финском заливе составляла $+16-17$ °С. Заплывы длились по 30 мин, отдых между заплывами был 90 мин. При анализе данных ЭКГ у 3 из 4 пловцов выявлено статистически значимое увеличение Q-Tc показателя (табл. 5). У одного спортсмена этот показатель статистически значимо сократился.

После обеих эстафет у пловцов на 30-й минуте восстановления АД изменилось не существенно. Так, во втором заплыве ($t = +17$ °С) до эстафеты САД — $119,4 \pm 7,3$ мм рт. ст.; ДАД — $78 \pm 4,5$ мм рт. ст.; после заплывов эстафеты САД — $123,3 \pm 8,5$ мм рт. ст.; ДАД — $73 \pm 5,3$ мм рт. ст., соответственно. Однако наблюдения за динамикой

Таблица 3. Изменение уровня артериального давления (мм рт. ст.) под воздействием шестинедельной холодо-гипоксической тренировки ($n = 40$)

Показатели	САД в покое	ДАД в покое	САД при ХГВ	ДАД при ХГВ	САД восст.	ДАД восст.
До тренировки	$108,3 \pm 4,1$	$62,7 \pm 4,4$	$122,2 \pm 6,7^{\circ}$	$84,2 \pm 5,3^{\circ\circ}$	$105,8 \pm 4,9$	$60,9 \pm 4,1$
После тренировки	$110,4 \pm 7,8$	$62,1 \pm 3,6$	$135,3 \pm 5,1^{*\circ\circ}$	$71,2 \pm 4,8^{\circ}$	$104,5 \pm 6,1$	$58,7 \pm 4,3$

Примечания: $^{\circ}$, $^{\circ\circ}$ — $p < 0,05$; $^{\circ\circ}$ — $p < 0,01$; * — значимость различий до и после тренировки; $^{\circ}$ — значимость различий между показателями пробы ХГВ и исходным состоянием.

Таблица 4. Изменение показателей проводимости сердца до и после заплывов (при температуре воды $t = +8\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Показатели ЭКГ	Пловец 1		Пловец 2		Пловец 3		Пловец 4	
	До	После	До	После	До	После	До	После
R-Rcp	696 ± 32	693 ± 37	662 ± 37	584 ± 22*	560 ± 25	648 ± 27*	1088 ± 42	781 ± 25*
P-Q,ms	172 ± 8,1	174 ± 7,1	140 ± 4,2	148 ± 5,2	152 ± 4,4	164 ± 5,1*	158 ± 3,9	165 ± 4,3
QRS	86 ± 4,3	106 ± 5,3*	80 ± 4,9	86 ± 5,1	84 ± 3,6	86 ± 4,2	107 ± 6,1	102 ± 5,9
QTc	457 ± 19	501 ± 21*	447 ± 17	448 ± 22	445 ± 23	498 ± 25*	402 ± 21	420 ± 27

Примечания: до — исходное состояние перед заплывом, после — 30–40 мин восстановления по окончании эстафеты. * — $p < 0,05$, по t -критерию Стьюдента, представлен анализ индивидуальных данных после заплыва относительно исходного состояния (длительность регистрации ЭЭГ 5 мин).

давления спортсменов ($n = 17$) во время соревнований сразу после заплывов 200 м дистанции (на 3–5-й минутах восстановления) при температуре воды $+1,5\text{--}2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ показали существенные изменения. В целом по группе наблюдали достоверное увеличение уровня САД. В покое САД = $134,4 \pm 6,1$ мм рт. ст., после заплыва — $148,5 \pm 5,2$ мм рт. ст. ($p < 0,05$); ДАД в покое = $79,8 \pm 3,1$ мм рт. ст., после заплыва — $91,3 \pm 7,1$ мм рт. ст. ($p < 0,05$). При этом у некоторых пловцов давление изменялось незначительно, но у других САД повышалось до 190 мм рт. ст., а ДАД — до 120 мм рт. ст. Их из общей группы для статистической обработки исключили. ЧСС после заплывов на дистанции 200 м увеличилась (в состоянии покоя ЧСС = $76,8 \pm 4,4$ уд/мин, после заплыва — $98,1 \pm 4,7$ уд/мин; $p < 0,01$). Но у одного обследованного ЧСС после заплыва в холодной воде значительно уменьшалась (до заплыва — 88 уд/мин, после заплыва — 64 уд/мин).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ лабораторных наблюдений с использованием пробы ХГВ показал, что при погружении в холодную воду всего лишь лица можно зарегистрировать комплекс реакций, отражающих существенное изменение характеристик деятельности сердечно-сосудистой системы. Причина этому — реализация так называемого нырятельного рефлекса [17–19], представляющего собой сложный комплекс рефлекторных актов, сопровождающихся одновременной активацией симпатического и парасимпатического отделов ВНС, посылающих сигналы на миокард. Суммарный эффект влияния на синоатриальный узел со стороны *n. vagus* и постганглионарных симпатических нейронов зависит также от фонового состояния клеток синоатриального узла, которое формируется под воздействием различных нейропептидов, выделяющихся эндотелием сосудов и кардиомиоцитами. Величина ответной реакции сердечно-сосудистой системы при заплывах в холодной воде варьирует в зависимости не только от внешних

факторов, таких как температура воды, адаптация к холоду и пр., но и от индивидуальных особенностей вегетативной реактивности организма. При этом реакция ныряния вызывает парасимпатическую брадикардию, тогда как холодовой стресс активирует симпатическую тахикардию. Эти разнонаправленные воздействия могут привести к аритмиям [7, 8], особенно у людей с ярко выраженной нырятельной брадикардией. Так, у некоторых представителей высокорезистивного и реактивного типов под воздействием рефлекторных парасимпатических влияний на синусовый узел сердца, с ярко выраженным эффектом брадикардии, имеются случаи предсердно-желудочковой блокады — нарушения проведения импульса к желудочкам от предсердий (увеличение PQ-интервала, превышающее норму). У некоторых представителей парадоксального типа, реагирующих на ХГВ как на стресс — увеличением симпатических влияний на миокард — на фоне уменьшения длительности сердечного цикла встречаются замедления внутрисердечного проведения возбуждения (увеличение QTc показателя, выходящего за пределы нормы). Подобная реакция часто встречается при заплывах в открытой холодной воде, в том числе у опытных, адаптированных к холодной воде пловцов. Эти данные подтверждают сложившееся в настоящее время представление об аритмогенном характере нырятельного рефлекса [6–8]. Кроме того, эти отклонения могут усиливаться при нарушении K^+ обмена при физической нагрузке во время заплывов, а также вследствие переохлаждения организма во время заплывов и в течение нескольких минут после них при продолжающемся понижении температуры тела, в том числе температурного ядра организма. Эти факторы могут повышать риск достижения QTc показателем критических величин, способных привести к остановке сердца [20, 21].

Констрикция периферических сосудов при реализации нырятельного ответа происходит под влиянием сигналов из сосудодвигательного центра продолговатого мозга по адренергическим симпатическим волокнам на их мышечные стенки. У некоторых обследованных, преимущественно высокорезистивных, при серии ХГВ

Таблица 5. Изменение показателей проводимости сердца до и после эстафетного заплыва (при температуре воды $t = +17\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Показатели ЭКГ	Пловец 1		Пловец 2		Пловец 3		Пловец 4	
	До	После	До	После	До	После	До	После
R-Rcp	927 ± 25	1105 ± 39**	718 ± 27	674 ± 23	961 ± 29	637 ± 19**	956 ± 31	789 ± 41**
P, ms	120 ± 3,7	114 ± 4,1	124 ± 4,1	116 ± 4,2	124 ± 7,1	110 ± 7,3	114 ± 4,5	110 ± 3,1
P-Q, ms	168 ± 4,3	169 ± 5,1	177 ± 4,1	162 ± 4,7*	173 ± 7,1	160 ± 7,4	150 ± 4,3	146 ± 3,9
QRS	94 ± 5,9	83 ± 4,9	85 ± 3,7	90 ± 4,1	97 ± 4,9	96 ± 4,7	88 ± 4,4	88 ± 4,1
QT, ms	464 ± 17	429 ± 18	371 ± 11	372 ± 17	423 ± 23	394 ± 21	400 ± 17	390 ± 15
QTc	482 ± 28	393 ± 29*	440 ± 7,5	459 ± 11*	434 ± 24	492 ± 25**	405 ± 16	439 ± 15*

Примечания: до — исходное состояние перед заплывом, после — 30–40 мин восстановления по окончании эстафеты. * — $p < 0,05$; ** — $p < 0,01$, по t -критерию Стьюдента, представлен анализ индивидуальных данных после заплыва относительно исходного состояния (длительность регистрации ЭКГ 5 мин).

наблюдается прогрессирующее повышение уровня АД при каждом последующем погружении лица в холодную воду, что связано с медленным восстановлением тонуса периферических сосудов, не успевающих вернуться к исходному состоянию за двухминутный интервал между погружениями. Подобную реакцию мы наблюдали и у некоторых пловцов зимнего плавания, когда следующие друг за другом с небольшими перерывами заплывы в холодной воде сопровождались стойким повышением АД. Дальнейшие обследования их в лабораторных условиях с использованием пробы ХГВ подтвердили этот факт.

Меняет ли адаптация к погружению в холодную воду характер сердечно-сосудистого ответа? 6-недельная тренировка локального охлаждения лица посредством пробы ХГВ показала, что периферический вазоспазм у обследованных несколько снижается, что отражается на статистически значимо менее выраженном повышении уровня ДАД во время ХГВ. САД, напротив, достоверно повышается во время ХГВ, а следовательно, повышается пульсовое давление, косвенно отражающее увеличение ударного объема левого желудочка. На фоне развивающейся брадикардии это дает возможность поддерживать на необходимом уровне мозговой кровотока [19, 22–25]. Таким образом, эти изменения адаптивны и имеют защитный характер. Реактивность хронотропной функции сердца на ХГВ после адаптации также снижается. Но у некоторых испытуемых реактивность и сердечная, и сосудистая сохраняются высокими, что, возможно, обусловлено генетическими особенностями, в частности, эффекторного звена сосудистого ответа. Рефлекторная регуляция тонуса сосудов кожи и мышечных тканей находится под контролем симпатического отдела вегетативной регуляции и реализуется через α_1 -адренорецепторы (констрикторная функция) и β_2 -адренорецепторы (дилататорная функция). Выраженность рефлекторного ответа зависит от соотношения этих рецепторов и эффективности их функционирования,

которые в большой мере генетически детерминированы. Вместе с тем существенное влияние на реализацию рефлекторных сосудистых реакций оказывает текущий биохимический фон, который зависит, в частности, от активности ренин-ангиотензиновой и кинин-брадикининовой систем. Так, нами показано (на модели ХГВ), что тонус сосудов и АД при реализации нырятельного ответа в существенной мере зависят от полиморфизма генов, кодирующих *ADRA1A* (rs1048101), *BDKRB2* (rs1799722), *ADBR2* (rs1042713) и *ACE* (I/D, rs4340) [12, 13].

ВЫВОДЫ

Наибольший риск при заплывах в холодной воде связан с нарушением функций сердечно-сосудистой системы. Необходимо учитывать, что у практически здоровых людей с адекватной реакцией организма на физическую нагрузку под воздействием холодной воды могут формироваться патологические изменения функций сердечно-сосудистой системы: сердечные аритмии, в том числе и фатального характера, резкое повышение уровня АД, с вытекающими из этого последствиями. Есть особенности регуляторных систем, прежде всего вегетативной нервной системы, связанной с реализацией рефлекторных защитных механизмов организма, которые увеличивают риск патологического ответа на холодовой раздражитель. Это повышенная реактивность на экстремальные воздействия автономного контура регуляции и его эффекторного звена — миокарда, а также гладкомышечных стенок периферических сосудов кожи, неработающих мышц, ЖКТ. В связи с этим необходима разработка дополнительных методов тестирования и критериев допуска спортсменов зимнего плавания к тренировкам и соревнованиям холодным плаванием. На наш взгляд, проба ХГВ, осуществляемая под контролем ЭКГ и АД, может быть весьма информативной для выявления людей, попадающих в группу риска по показателям сердечно-сосудистой системы.

Литература

- Huttunen P, Rintamäki H. Effect of regular winter swimming on the activity of the sympathoadrenal system before and after a single cold water immersion. *Int J Circumpolar Health*. 2001; 60 (3): 400–6. PMID: 11590880.
- Vybíral S, Lesná I, Jansky L, Zeman V. Thermoregulation in winter swimmers and physiological significance of human catecholamine thermogenesis. *Exp Physiol*. 2000; 85 (3): 321–6. PMID: 10825419.
- Blondin DP, Tingelstad HC, Mantha OL, Gosselin C, Haman F. Maintaining thermogenesis in cold exposed humans: relying on multiple metabolic pathways. *Compr Physiol*. 2014; 4 (4): 1383–402. DOI: 10.1002/cphy.c130043. PMID: 25428848.
- Sjøberg S, Löfgren J, Philipsen FE, Jensen M, Hansen AE, Ahrens E, et al. Altered brown fat thermoregulation and enhanced cold-induced thermogenesis in young, healthy, winter-swimming men. *Cell Rep Med*. 2021; 2 (10): 100408. DOI: 10.1016/j.xcrm.2021.100408. PMID: 34755128. PMID: PMC8561167.
- Londin DP, Frisch F, Phoenix S, Guérin B, Turcotte ÉE, Haman F, et al. Inhibition of Intracellular Triglyceride Lipolysis Suppresses Cold-Induced Brown Adipose Tissue Metabolism and Increases Shivering in Humans. *Cell Metab*. 2017; 25 (2): 438–47. DOI: 10.1016/j.cmet.2016.12.005. Epub 2017 Jan 12. PMID: 28089568.
- Lundell RV, Räisänen-Sokolowski AK, Wuorimaa TK, Ojanen T, Parkkola KI. Diving in the Arctic: Cold Water Immersion's Effects on Heart Rate Variability in Navy Divers. *Front Physiol*. 2020; 10: 1600. DOI: 10.3389/fphys.2019.01600. PMID: 32082177. PMID: PMC7005786.
- Shattock MJ, Tipton MJ. 'Autonomic conflict': A different way to die during cold water immersion? *J Physiol*. 2012; 590: 32193230. DOI: 10.1113/jphysiol.2012.229864.
- Tipton MJ, Kelleher PC, Golden FS. Supraventricular arrhythmias following breath-hold submersions in cold water. *Undersea Hyperb. Med J Undersea Hyperb Med Soc*. 1994; 21: 305–13.
- Datta A, Tipton M. Respiratory responses to cold water immersion: neural pathways, interactions, and clinical consequences awake and asleep. *J Appl Physiol* (1985). 2006; 100 (6): 2057–64. DOI: 10.1152/jappphysiol.01201.2005. PMID: 16714416.
- Knechtle B, Waśkiewicz Z, Sousa CV, Hill L, Nikolaidis PT. Cold water swimming-benefits and risks: a narrative review. *Int J Environ Res Public Health*. 2020; 17 (23): 8984. DOI: 10.3390/ijerph17238984. PMID: 33276648. PMID: PMC7730683.
- Lundell RV, Ojanen T. A systematic review of HRV during diving in very cold water. *Int J Circumpolar Health*. 2023; 82 (1): 2203369. DOI: 10.1080/22423982.2023.2203369. PMID: 37079282. PMID: PMC10120448.
- Baranova TI, Berlov DN, Glotov AS, Glotov OS, Zavarina LB, Kachanova TA, et al. Some genetic determinants of vascular responses in simulated human diving. *Journal of evolutionary biochemistry and physiology*. 2019; 55 (3): 231–4. DOI: 10.1134/

- S0022093019030086.
13. Baranova TI, Podyacheva EYu, Zemlyanukhina TA, Berlov DN, Danilova MM, Glotov OS, et al. Vascular reactions of the diving reflex in men and women carrying different ADRA1A Genotypes. *Int J Mol Sci.* 2022; 23 (16): 9433. DOI: 10.3390/ijms23169433. PMID: 36012699. PMCID: PMC9409260.
 14. Baranova TI, Berlov DN, Glotov OS, Korf EA, Minigalin AD, Mitrofanova AV, et al. Genetic determination of the vascular reactions in humans in response to the diving reflex. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2017; 312: 622–31. DOI: 10.1152/ajpheart.00080.2016.
 15. Haman F, Souza SCS, Castellani JW, Dupuis MP, Friedl KE, Sullivan-Kwantes W, et al. Human vulnerability and variability in the cold: Establishing individual risks for cold weather injuries. *Temperature (Austin).* 2022;9(2):158–95. DOI:10.1080/23328940.2022.2044740. PMID: 36106152. PMCID: PMC9467591.
 16. Баранова Т. И., Ноздрачев А. Д., Январева И. Н. Формализация критериев оценки нырятельной реакции и адаптации к холодо-гипокси-гиперкапническому воздействию у человека. *Biological Communications.* 2005; 2: 107–14.
 17. Gooden BA. Why some people do not drown. Hypothermia versus the diving response. *Med J Aust.* 1992; 157 (9): 629–32. DOI: 10.5694/j.1326-5377.1992.tb137408.x. PMID: 1406426.
 18. Malinowski KS, Wierzbę TH, Neary JP, Winkiewski PJ, Wszędybył-Winkiewska M. Resting heart rate affects heart response to cold-water face immersion associated with apnea. *Biology (Basel).* 2023; 12 (6): 869. DOI: 10.3390/biology12060869. PMID: 37372152. PMCID: PMC10295257.
 19. Nordine M, Schwarz A, Bruckstein R, Gunga HC, Opatz O. The human dive reflex during consecutive apnoeas in dry and immersive environments: magnitude and synchronicity. *Front Physiol.* 2022; 12: 725361. DOI: 10.3389/fphys.2021.725361. PMID: 35058791. PMCID: PMC8764278.
 20. Batra AS, Silka MJ. Mechanism of sudden cardiac arrest while swimming in a child with the prolonged QT syndrome. *J Pediatr.* 2002; 141 (2): 283–4. DOI: 10.1067/mpd.2002.126924. PMID: 12183730.
 21. Choi G, Kopplin LJ, Tester DJ, Will ML, Haglund CM, Ackerman MJ. Spectrum and frequency of cardiac channel defects in swimming-triggered arrhythmia syndromes. *Circulation.* 2004 Oct 12; 110 (15): 2119–24. DOI: 10.1161/01.CIR.0000144471.98080.CA. Epub 2004. PMID: 15466642.
 22. McKnight JC, Mulder E, Ruesch A, Kainerstorfer JM, Wu J, Hakimi N, et al. When the human brain goes diving: using near-infrared spectroscopy to measure cerebral and systemic cardiovascular responses to deep, breath-hold diving in elite freedivers. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2021; 376 (1831): 20200349. DOI: 10.1098/rstb.2020.0349. Epub 2021 Jun 28. PMID: 34176327. PMCID: PMC8237162.
 23. Bain AR, Drvis I, Dujic Z, MacLeod DB, Ainslie PN. Physiology of static breath holding in elite apneists. *Exp Physiol.* 2018; 103 (5): 635–51. DOI: 10.1113/EP086269. PMID: 29512224.
 24. Godek D, Freeman AM. Physiology, Diving Reflex. *StatPearls [Internet].* 2022. Available from: <https://www.statpearls.com/point-of-care/20629>. PMID: 30855833.
 25. Malinowski KS, Wierzbę TH, Neary JP, Winkiewski PJ, Wszędybył-Winkiewska M. Resting heart rate affects heart response to cold-water face immersion associated with apnea. *Biology (Basel).* 2023; 12 (6): 869. DOI: 10.3390/biology12060869. PMID: 37372152. PMCID: PMC10295257.

References

1. Huttunen P, Rintamäki H. Effect of regular winter swimming on the activity of the sympathoadrenal system before and after a single cold water immersion. *Int J Circumpolar Health.* 2001; 60 (3): 400–6. PMID: 11590880.
2. Vybíral S, Lesná I, Jansky L, Zeman V. Thermoregulation in winter swimmers and physiological significance of human catecholamine thermogenesis. *Exp Physiol.* 2000; 85 (3): 321–6. PMID: 10825419.
3. Blondin DP, Tingelstad HC, Mantha OL, Gosselin C, Haman F. Maintaining thermogenesis in cold exposed humans: relying on multiple metabolic pathways. *Compr Physiol.* 2014; 4 (4): 1383–402. DOI: 10.1002/cphy.c130043. PMID: 25428848.
4. Sjøberg S, Löfgren J, Philipson FE, Jensen M, Hansen AE, Ahrens E, et al. Altered brown fat thermoregulation and enhanced cold-induced thermogenesis in young, healthy, winter-swimming men. *Cell Rep Med.* 2021; 2 (10): 100408. DOI: 10.1016/j.xcrm.2021.100408. PMID: 34755128. PMCID: PMC8561167.
5. Londin DP, Frisch F, Phoenix S, Guérin B, Turcotte ÉE, Haman F, et al. Inhibition of Intracellular Triglyceride Lipolysis Suppresses Cold-Induced Brown Adipose Tissue Metabolism and Increases Shivering in Humans. *Cell Metab.* 2017; 25 (2): 438–47. DOI: 10.1016/j.cmet.2016.12.005. Epub 2017 Jan 12. PMID: 28089568.
6. Lundell RV, Räisänen-Sokolowski AK, Wuorimaa TK, Ojanen T, Parkkola KI. Diving in the Arctic: Cold Water Immersion's Effects on Heart Rate Variability in Navy Divers. *Front Physiol.* 2020; 10: 1600. DOI: 10.3389/fphys.2019.01600. PMID: 32082177. PMCID: PMC7005786.
7. Shattock MJ, Tipton MJ. 'Autonomic conflict': A different way to die during cold water immersion? *J Physiol.* 2012; 590: 32193230. DOI: 10.1113/jphysiol.2012.229864.
8. Tipton MJ, Kelleher PC, Golden FS. Supraventricular arrhythmias following breath-hold submersions in cold water. *Undersea Hyperb. Med J Undersea Hyperb Med. Soc.* 1994; 21: 305–13.
9. Datta A, Tipton M. Respiratory responses to cold water immersion: neural pathways, interactions, and clinical consequences awake and asleep. *J Appl Physiol (1985).* 2006; 100 (6): 2057–64. DOI: 10.1152/jappphysiol.01201.2005. PMID: 16714416.
10. Knechtle B, Waśkiewicz Z, Sousa CV, Hill L, Nikolaidis PT. Cold water swimming-benefits and risks: a narrative review. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17 (23): 8984. DOI: 10.3390/ijerph17238984. PMID: 33276648. PMCID: PMC7730683.
11. Lundell RV, Ojanen T. A systematic review of HRV during diving in very cold water. *Int J Circumpolar Health.* 2023; 82 (1): 2203369. DOI: 10.1080/22423982.2023.2203369. PMID: 37079282. PMCID: PMC10120448.
12. Baranova TI, Berlov DN, Glotov AS, Glotov OS, Zavarina LB, Kachanova TA, et al. Some genetic determinants of vascular responses in simulated human diving. *Journal of evolutionary biochemistry and physiology.* 2019; 55 (3): 231–4. DOI: 10.1134/S0022093019030086.
13. Baranova TI, Podyacheva EYu, Zemlyanukhina TA, Berlov DN, Danilova MM, Glotov OS, et al. Vascular reactions of the diving reflex in men and women carrying different ADRA1A Genotypes. *Int J Mol Sci.* 2022; 23 (16): 9433. DOI: 10.3390/ijms23169433. PMID: 36012699. PMCID: PMC9409260.
14. Baranova TI, Berlov DN, Glotov OS, Korf EA, Minigalin AD, Mitrofanova AV, et al. Genetic determination of the vascular reactions in humans in response to the diving reflex. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2017; 312: 622–31. DOI: 10.1152/ajpheart.00080.2016.
15. Haman F, Souza SCS, Castellani JW, Dupuis MP, Friedl KE, Sullivan-Kwantes W, et al. Human vulnerability and variability in the cold: Establishing individual risks for cold weather injuries. *Temperature (Austin).* 2022;9(2):158–95. DOI:10.1080/23328940.2022.2044740. PMID: 36106152. PMCID: PMC9467591.
16. Baranova TI, Nozdrachev AD, Janvareva IN. Формализация критериев оценки нырятельной реакции и адаптации к холодо-гипокси-гиперкапническому воздействию у человека. *Biological Communications.* 2005; 2: 107–14. Russian.
17. Gooden BA. Why some people do not drown. Hypothermia versus the diving response. *Med J Aust.* 1992; 157 (9): 629–32. DOI: 10.5694/j.1326-5377.1992.tb137408.x. PMID: 1406426.
18. Malinowski KS, Wierzbę TH, Neary JP, Winkiewski PJ, Wszędybył-Winkiewska M. Resting heart rate affects heart response to cold-water face immersion associated with apnea. *Biology (Basel).* 2023; 12 (6): 869. DOI: 10.3390/biology12060869. PMID: 37372152. PMCID: PMC10295257.

19. Nordine M, Schwarz A, Bruckstein R, Gunga HC, Opatz O. The human dive reflex during consecutive apnoeas in dry and immersive environments: magnitude and synchronicity. *Front Physiol.* 2022; 12: 725361. DOI: 10.3389/fphys.2021.725361. PMID: 35058791. PMCID: PMC8764278.
20. Batra AS, Silka MJ. Mechanism of sudden cardiac arrest while swimming in a child with the prolonged QT syndrome. *J Pediatr.* 2002; 141 (2): 283–4. DOI: 10.1067/mpd.2002.126924. PMID: 12183730.
21. Choi G, Kopplin LJ, Tester DJ, Will ML, Haglund CM, Ackerman MJ. Spectrum and frequency of cardiac channel defects in swimming-triggered arrhythmia syndromes. *Circulation.* 2004 Oct 12; 110 (15): 2119–24. DOI: 10.1161/01.CIR.0000144471.98080.CA. Epub 2004. PMID: 15466642.
22. McKnight JC, Mulder E, Ruesch A, Kainerstorfer JM, Wu J, Hakimi N, et al. When the human brain goes diving: using near-infrared spectroscopy to measure cerebral and systemic cardiovascular responses to deep, breath-hold diving in elite freedivers. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2021; 376 (1831): 20200349. DOI: 10.1098/rstb.2020.0349. Epub 2021 Jun 28. PMID: 34176327. PMCID: PMC8237162.
23. Bain AR, Drvis I, Dujic Z, MacLeod DB, Ainslie PN. Physiology of static breath holding in elite apneists. *Exp Physiol.* 2018; 103 (5): 635–51. DOI: 10.1113/EP086269. PMID: 29512224.
24. Godek D, Freeman AM. Physiology, Diving Reflex. *StatPearls [Internet].* 2022. Available from: <https://www.statpearls.com/point-of-care/20629>. PMID: 30855833.
25. Malinowski KS, Wierzba TH, Neary JP, Winklewski PJ, Wszędybył-Winklewska M. Resting heart rate affects heart response to cold-water face immersion associated with apnea. *Biology (Basel).* 2023; 12 (6): 869. DOI: 10.3390/biology12060869. PMID: 37372152. PMCID: PMC10295257.