

УДК 519.876.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.56.5.018](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.56.5.018)

## Разработка персонализированной системы управления процессом декомпрессии на основе интегрального критерия безопасности

Н.С. Сковпин<sup>1</sup>✉, М.В. Паринов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Райффайзенбанк», Воронеж, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация

**Резюме.** Повышение качества принимаемых решений при планировании декомпрессии подводных погружений является актуальной задачей современного развития систем планирования и управления декомпрессией. Статья посвящена описанию структурной организации и принципов функционирования комплексной адаптивной системы управления процессом декомпрессии, которая интегрирует классические модели на основе градиент-факторов с модулями мониторинга и оценки ключевых внешних факторов и физиологического состояния биологического объекта. В работе детально рассмотрена архитектура системы, включающая блоки планирования, обработки данных, прогнозирования, принятия решений, предназначенных для поиска оптимальных стратегий безопасного подъема. Для этого разработан интегральный критерий безопасности, агрегирующий пять ключевых показателей: текущую оценку температуры биологического объекта, параметров вязкости крови, оценку микропузырьковой нагрузки, суммарное время декомпрессионных остановок, исторический классификатор типа погружения. Решение задачи минимизации данного критерия при заданных ограничениях позволяет генерировать адаптивный персонализированный профиль декомпрессии. Описан алгоритм микропузырьковой коррекции времени остановок, строящийся на базовом плане по модели градиент-факторов и адаптирующий время декомпрессионных остановок при превышении пороговых значений микропузырькового критерия. Предложенный подход подтверждает свою эффективность в повышении качества принимаемых решений при планировании и управлении процессом декомпрессии, а адекватность разработанного математического и алгоритмического аппарата верифицирована посредством моделирования различных стратегий всплытия.

**Ключевые слова:** декомпрессия, подводные погружения, критерий безопасности, система управления, структурная схема, оптимальная стратегия, градиент-фактор, экспертная система.

**Для цитирования:** Сковпин Н.С., Паринов М.В. Разработка персонализированной системы управления процессом декомпрессии на основе интегрального критерия безопасности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(5). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2328> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.56.5.018

## Development of a personalized decompression control system based on an integral safety criterion

N.S. Skovpin<sup>1</sup>✉, M.V. Parinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint stock company Raiffeisenbank, Voronezh, the Russian Federation

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

**Abstract.** Improving the quality of decision-making in dive decompression planning is a relevant task in the modern development of decompression planning and management systems. The article describes the structural organization and operating principles of a comprehensive adaptive decompression control

system. The system integrates classical gradient factor models with modules for monitoring and assessing key external factors and the physiological state of the diver. The paper details the system architecture, which includes planning, data processing, forecasting and decision-making blocks designed to identify optimal safe ascent strategies. To achieve this, an integral safety criterion was developed that aggregates five key indicators: current diver body temperature estimation, blood viscosity parameters, microbubble load assessment, total decompression stop time, and a historical dive type classifier. Solving the minimization problem of this criterion under specified constraints allows for the generation of an adaptive, personalized decompression profile. An algorithm for microbubble-based correction of stop times is described, built upon a baseline gradient factor plan and adaptively adjusting stop durations when threshold values of the microbubble criterion are exceeded. The proposed approach demonstrates its effectiveness in enhancing decision-making quality for decompression planning and management. Furthermore, the adequacy of the developed mathematical and algorithmic framework has been verified through the simulation of various ascent strategies.

**Keywords:** decompression, underwater diving, safety criterion, control system, structural diagram, optimal strategy, gradient factor, expert system.

**For citation:** Skovpin N.S., Parinov M.V. Development of a personalized decompression control system based on an integral safety criterion. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(5). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/article?id=2328> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.56.5.018

## Введение

Процесс декомпрессии – это физический процесс, протекающий при снижении внешнего давления, в ходе которого инертные газы выводятся из биологического объекта. Хотя данный процесс сложен и трудно наблюдаем, он требует контроля и управления, что критически важно для широкого круга активностей и профессий, связанных с нахождением в условиях повышенного давления, включая космонавтику, профессиональные подводные погружения, высотную авиацию [1]. Наибольшее значение управление процессом декомпрессии представляет для подводных погружений, так как перепад давления в этом случае в условиях планеты Земля может быть наибольшим, следовательно, риск негативного воздействия выше. Управление данным процессом характеризуется созданием специальных планов выведения избыточного газа из тканей объекта декомпрессии. Следуя плану, биологический объект снижает вероятность опасных повреждений, называемых декомпрессионной болезнью (ДКБ).

Системы управления процессом декомпрессии необходимы в первую очередь для автоматизации планирования и контроля этапов и режимов выполнения всех декомпрессионных обязательств. Главной проблемой создания таких информационных систем является то, что имеющиеся системы используют устаревший математический, алгоритмический и программный аппарат, не позволяющий учитывать реальные факторы декомпрессии. Для успешной декомпрессии человеку логично выбрать максимально долгий по времени план декомпрессии, позволяющий с течением времени удалить все избытки газа. Однако при такой конфигурации человек в зависимости от своей физической формы, состояния здоровья, свойств метаболизма и множества других факторов может устать, переохладиться, травмироваться, что способствует увеличению вероятности возникновения ДКБ. Кроме того, существующие системы не способны обучаться на ранее созданных профилях декомпрессии, не способны выполнять расчеты и прогнозирование декомпрессии, одновременно используя несколько апробированных математических и физических моделей, описывающих данный процесс. Следовательно, каждая из известных методик по отдельности имеет повышенную вероятность возникновения ДКБ и не позволяет производить адаптивную индивидуальную настройку планов декомпрессии. В данной статье с учетом работы [2] предлагается

решение задачи создания адаптивных и персонализированных систем управления процессом декомпрессии, переходя от упрощенных моделей к интеллектуальной системе управления процессом декомпрессии, которая позволяет не только автоматизировать подъем биологического объекта на поверхность, но и выступать в качестве средства поддержки принятия решений в условиях повышенного риска. Предлагаемый подход реализует комплексную систему управления процессом декомпрессии, основанную на персонализированных данных, интеграции физиологических параметров, учете внешних факторов декомпрессии, прогнозировании риска декомпрессии. Результаты исследования демонстрируют адекватность разработанного математического, алгоритмического и программного обеспечения системы управления процессом декомпрессии, позволяющего повысить качество принимаемых решений при планировании: значительно сократить время на многофакторный анализ параметров декомпрессии, повысить вероятность безопасности будущей декомпрессии, оптимально подобрать режимы декомпрессии.

### Материалы и методы

Основой для построения структурной схемы разработанной системы управления процессом декомпрессии служит формализация объекта управления, представляющего собой комплексный многофакторный процесс декомпрессии, поведение которого определяется нестационарными процессами десатурации тканей и кинетикой роста микропузырьков. Функционирование объекта управления определяется множеством факторов, из которых выделяются управляющие воздействия, задающие траекторию движения биологического объекта, и возмущающие воздействия, дестабилизирующие режим плановой безопасной десатурации тканей. Отметим, что область исследования настоящей работы ограничена условиями водной среды, поэтому в качестве управляющих воздействий выступают: скорость подъема, глубина декомпрессионных остановок, продолжительность остановок, состав дыхательной смеси. Из множества возможных возмущающих воздействий выделим ключевые факторы, оказывающие наибольшее влияние на безопасность процесса в водной среде. К таким воздействиям относятся: температура воды и терморегуляция биологического объекта, физическое состояние, опыт погружений, метаболическая активность, индивидуальные особенности, заболевания и травмы биологического объекта, итеративность декомпрессии, вредные привычки объекта декомпрессии, погодные условия в месте осуществления декомпрессии.

Повышение качества принятия управленческих решений в разработанной системе управления процессом декомпрессии зависит от баланса между управляющими и возмущающими воздействиями, сочетая несколько ключевых принципов:

1. Персонализация в системе достигается учетом индивидуальных статических возмущений биологического объекта, позволяющих сформировать оптимальный план декомпрессии.

2. Адаптивность в системе обеспечивается способностью системы корректировать стратегию подъема биологического объекта в ответ на динамические возмущения.

3. Интеллектуальность в системе появляется за счет прогнозирования класса будущей декомпрессии, а также за счет экспертной системы для определения реальных параметров биологической жидкости и степени закупорки сосудов.

Исходя из этого, представим описание структуры современной системы управления декомпрессии с применением модифицированной модели планирования

декомпрессии (ММПД) и интеллектуальных средств прогнозирования рисков декомпрессии (ИСПРД). Структурная схема представлена на Рисунке 1.

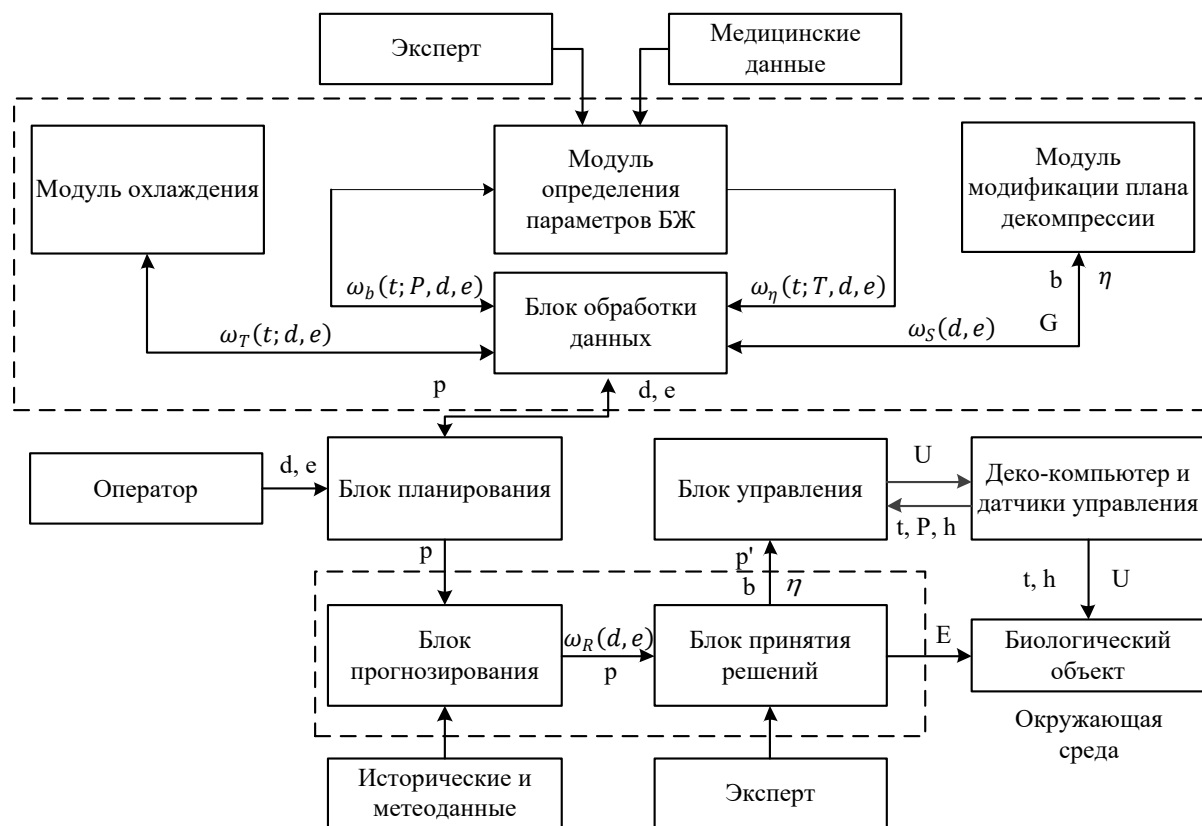


Рисунок 1 – Структурная схема управления процессом декомпрессии на основе ММПД и ИСПРД

Figure 1 – Structural diagram of the decompression process control system based on the MDPM and IDRPT

Структура реализует гибридный режим управления процессом декомпрессии, когда система обладает ограниченной обратной связью, позволяющей декомпрессионному компьютеру и датчикам управления собирать базовые метрики по ходу выполнения реального погружения для адаптации и реакции на внештатные ситуации, на отклонения биологического объекта от первоначальной стратегии погружения.

В структуру разработанной системы управления процессом декомпрессии входят множество математических и алгоритмических блоков. Оператор или пользователь системы инициирует создание базового профиля декомпрессии, взаимодействуя с блоком планирования, передавая в него массив входных параметров  $d$  (параметры биологического объекта),  $e$  (параметры окружающей среды). Данный блок создает план декомпрессии на основе табличных значений и порогов классической модели декомпрессии, называемой моделью градиент-фактором. Дополнительно в блоке планирования производится анализ входных данных, а также осуществляется вывод численных параметров. Структурированный план декомпрессии, включающий временные интервалы подъема, декомпрессионных остановок на заданных глубинах, моменты смены газовой смеси, передается в блок обработки данных. Последовательный вызов математических модулей ММПД позволяет уточнять параметры, влияющие на

декомпрессии, отслеживать динамику возмущающих воздействий, модифицировать план.

Модуль охлаждения позволяет определить динамику теплообмена между биологическим объектом и водной средой, минимальную температуру после всплытия, оценивать время до гипотермии. В данном модуле используются существующие законы (закон сохранения энергии, закон Ньютона-Рихмана), которые адаптируются под условия подводных погружений [3]. Учитывая индивидуальные особенности биологического объекта, тип термозащиты, температуру окружающей воды, температуру вдыхаемого газа, построена модель охлаждения как функция от времени:

$$\omega_T(t; d, e) = Q_t R_e - Q_r R_e + T_w - (Q_t R_e - Q_r R_e + T_w - T_{io}) \exp \left[ -\frac{t}{C_e W_b R_e} \right], \quad (1)$$

где  $Q_t = Q_t(d)$  – тепловая мощность, выработка тепла объектом декомпрессии (Вт), вычисляемая по табличным значениям на основе множества индивидуальных параметров (физическая форма, заболевания, возраст, пол, травмы, лишний вес и т. д.),  $Q_r = Q_r(d)$  – тепловая мощность, тепловые потери объекта при дыхании (Вт), учитывающие температуру вдыхаемого газа, глубину погружения,  $T_w$  – температура воды (°C),  $T_{io}$  – начальная температура биологического объекта (°C),  $R_e = R_e(d, e)$  – эквивалентное тепловое сопротивление (по формальной аналогии с электрической цепью, получаемое как сумма теплового сопротивления конвекции и теплового сопротивления костюма – мокрого или сухого [4]) (°C/Вт),  $W_b$  – масса объекта декомпрессии (кг),  $C_e$  – теплоемкость биологического объекта (Дж/(кг°C)).

Математический модуль определения параметров биологической жидкости представляет из себя экспертную систему, способную на основе заданных входных и выходных лингвистических переменных, базы знаний, правил, определять степень закупорки сосудов  $b$  и вязкость крови  $\eta$ , используя математический аппарат нечеткой логики и логического вывода Мамдани [5]. Выходной кортеж значений является индивидуальной оценкой, которая используется в качестве коэффициентов в динамических моделях вязкости и оценки пузырьковой нагрузки. Так, в ходе декомпрессионного погружения кровь подвергается непрерывным изменениям, которая в большей степени зависит от охлаждения объекта. Снижение микроциркуляции, повышение вязкости крови приводит к тому, что реальная скорость десатурации тканей становится ниже расчетной, создавая скрытый риск образования пузырей даже при соблюдении стандартных лимитов градиентов. Модель изменения вязкости от времени имеет следующий вид:

$$\omega_\eta(t; d, e) = \eta_0 (1 + \eta_k (T_{io} - \omega_T(t; d, e))) \cdot (1 + \eta(d, e)), \quad (2)$$

где  $\eta(d, e)$  – определенная с помощью экспертной системы оценка вязкости,  $\eta_0$  – вязкость крови при нормальной температуре  $T_{io} = 37^\circ\text{C}$ ,  $\eta_k$  – коэффициент температурной чувствительности, взятый из клинических данных, равный 0,02–0,03,  $\omega_T(t; d, e)$  – температура объекта декомпрессии в момент времени  $t$ .

При наличии закупорок сосудов, при наличии препятствий нормальный кровоток нарушается, появляются зоны стагнации, где процесс выведения газа значительно замедляется, в то время как внешнее давление продолжает снижаться в соответствии с профилем всплытия. Оценка закупорки сосудов, вычисленная экспертной системой, трансформируется в поправку к парциальному давлению инертного газа в лидирующем компартменте. Получаем простую динамическую модель оценки пузырьковой нагрузки.

$$\omega_b(t; d, e) = P_{\max}(t, e) \cdot b(d, e), \quad (3)$$

где  $b(d, e)$  – определенная с помощью экспертной системы оценка вязкости,  $P_{max}(t, e)$  – максимальное парциальное давление инертного газа в тканях  $\max_i(P_i(t; e))$ , вычисляемое с помощью формулы Шрейнера [6].

В последнем модуле ММПД реализован алгоритм микропузырьковой корректировки [7]. Основная цель данной корректировки – это учет микропузырькового критерия безопасности. Таким образом, в данном модуле производится объединение преимуществ классической теории и микропузырьковой теории декомпрессии. Алгоритм заключается в следующем: параллельно с проверкой градиент-факторов производится расчет микропузырькового критерия. В зависимости от выбранной модели пузырьковой кинетики, данным критерием может выступать: суммарный объем микропузырьков, максимальный радиус микропузырьков, степень эмболизации [8]. При нарушении микропузырькового критерия алгоритм пытается увеличить длительность текущей декомпрессионной остановки, чтобы снизить перенасыщение тканей. Однако увеличение времени остановки допускается при одновременном выполнении системы ограничений безопасности: температура биологического объекта не должна опускаться ниже температуры переохлаждения, общее количество увеличений не должно превышать заданный лимит, время модифицированного профиля декомпрессии не должно превышать время сверхконсервативного профиля, при создании которого использовались низкие значения градиент-факторов. Описанный алгоритм представлен на Рисунке 2.

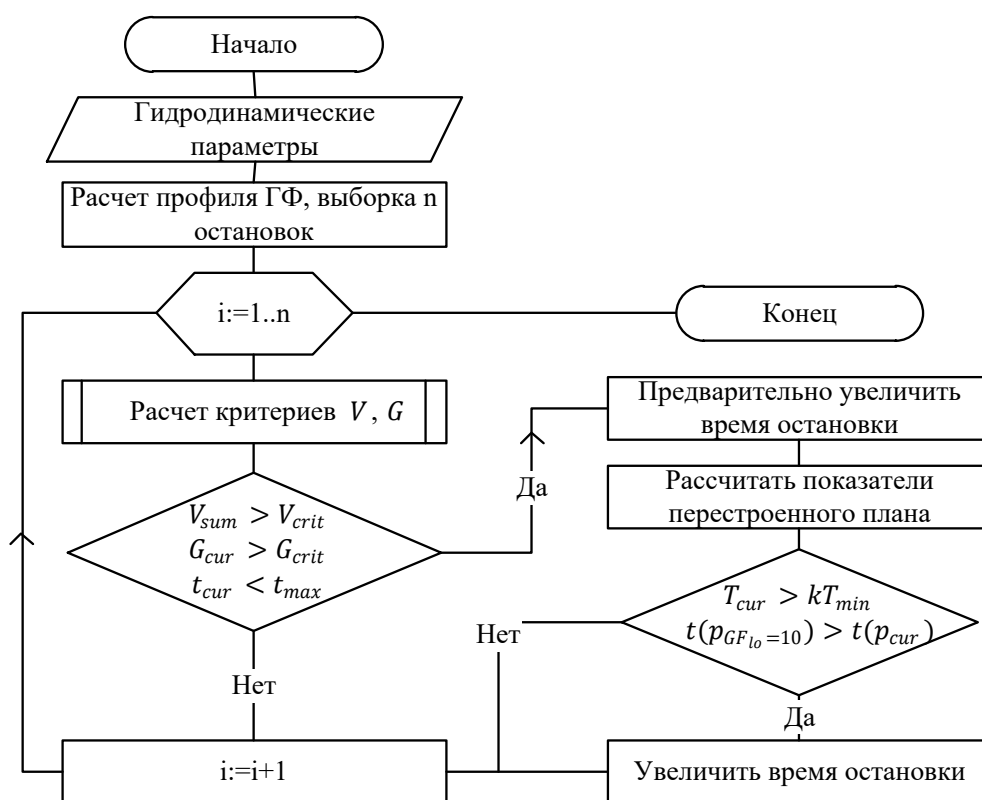


Рисунок 2 – Алгоритм микропузырьковых корректировок для модификации времени декомпрессионных остановок

Figure 2 – Microbubble correction algorithm for decompression stops

По модифицированному плану декомпрессии происходит расчет суммарного времени декомпрессионных остановок.

$$\omega_s = \sum_{i=0}^n t_{d.stop.i}(p, T, d, e), \quad (4)$$

где  $n$  – количество остановок,  $t_{d.stop.i}$  – время конкретной декомпрессионной остановки стратегии погружения (которое могло также быть модифицировано алгоритмом корректировок),  $T$  – температура биологического объекта.

После обработки профиля декомпрессии модулями ММПД он поступает в нижнюю часть структурной схемы в контур ИСПРД, где в блоке прогнозирования решается задача классификации будущего погружения (Рисунок 1). Еще на этапе планирования декомпрессионного погружения определяется исторический риск декомпрессии, повышая вероятность безопасности погружения в целом. На основе исторических профилей декомпрессии, которые обогащаются информацией о биологическом объекте, о параметрах окружающей среды, подготавливаются мастер таблицы с нужным набором атрибутов, после чего строится модель классификации алгоритмом случайного леса [9]. Итоговый класс риска формируется путем объединения предсказаний всех деревьев через голосование:

$$\omega_R = \arg \max_c \sum_{t=1}^T \mathbb{I}(h_t(p)), \quad (5)$$

где  $\omega_R$  – итоговое предсказание класса риска для плана декомпрессии  $p$ ,  $c$  – один из возможных классов,  $T$  – количество деревьев,  $h_t(p)$  – предсказание  $t$ -го дерева,  $\mathbb{I}(h_t(p))$  – индикаторная функция.

В данной статье несколько раз упоминался термин критерия безопасности. Так, в классических моделях декомпрессии безопасность оценивается бульмановским М-значением [10]. В более современных классических моделях, к которым относится модель градиент-фактора, таким критерием выступает значение GF – процент от М-значения. А в пузырьковых моделях декомпрессии существует свой критерий безопасности, оценивающий радиус или объем микропузырьков. Вышеописанные критерии не учитывают индивидуальные особенности биологического объекта, параметры окружающей среды, внешние факторы и возмущения. Принимаемые решения на основе таких критериев носят рискованный характер. Поэтому в разработанной системе управления процессом декомпрессии сформулирован новый критерий безопасности  $E$ . В блоке принятия решений выполняется поиск оптимальной стратегии декомпрессии  $p'$ , обеспечивающего максимальную расчетную безопасность, где созданный критерий безопасности  $E$  принимает минимальное значение. Критерий при этом носит интегральный характер. Так как профиль декомпрессии  $p(t)$  имеет ступенчатую траекторию подъема, логично для вычисления интеграла использовать кусочно-постоянную аппроксимацию, где интеграл заменяется на сумму значений по ступеням. Дополнив критерий настроечными коэффициентами ( $k_1..k_5$ ) и нормировав каждое слагаемое, получим задачу минимизации критерия  $E$  в следующем виде:

$$E(p; d, e) = \sum_{i=0}^n \left[ k_1 \frac{|\omega_T(t; d, e) - T_{io}|}{T_{max} - T_{crit}} + k_2 \frac{\omega_\eta(t; \omega_T(t; d, e), d, e)}{\eta_{max}} + k_3 \frac{\omega_b(t; P_{max}(t, e), d, e)}{b_{max}} \right] \cdot t_i + k_4 \frac{\omega_s(p, T, d, e)}{t_{max}} + k_5 \frac{\omega_R(p, d, e)}{R_{max}} \rightarrow \min_{p \in X}, \quad (7)$$

$$X = \{T_{crit} \leq T \leq T_{max}, t < t_{max}, \eta < \eta_{max}, n_{mod} \leq n_{max}\},$$

где  $n_{mod}$  – максимальное количество микропузырьковых модификаций,  $\eta_{max}$  – верхняя граница допустимой вязкости, при которой возможны гемореологические нарушения ( $6 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ),  $T_{crit}$  – температура переохлаждения ( $35^\circ\text{C}$ ),  $T_{max}$  – температура гипертермии ( $38^\circ\text{C}$ ),  $b_{max}$  – безопасный уровень парциального давления, при котором не ожидается значительного пузырькового риска (Па),  $R_{max}$  – максимального значение класса

декомпрессии,  $\omega_T, \omega_\eta, \omega_b, \omega_S, \omega_R$  – интегральная оценка риска по температуре, вязкости, степени закупорки сосудов, суммарного времени остановок, прогнозируемому риску,  $n$  – количество остановок,  $t_i$  – время остановки (с),  $t_{max}$  – время до гипотермии (с),  $P_{max}$  – максимальное парциальное давление инертного газа в тканях (Па).

Найденный оптимальный режим декомпрессии поступает в блок управления, где производится создание управляющих воздействий, управляющих команд  $U$ . Управляющие команды могут быть следующих типов: спуск на глубину, подъем на глубину, остановка с длительностью, смена газовой смеси, возврат на заданную глубину. Разработанная система управления процессом декомпрессии способна интегрироваться с декомпрессионными компьютерами, то есть с устройством управления, которое контролирует соблюдение оптимальной стратегии подъема, которое посылает команды  $U$  на биологический объект. Биологический объект, в свою очередь, должен выполнять поставленные команды, перемещаясь на заданные глубины  $h$  в соответствии со временем  $t$  и давлением  $P$ . Обратно в блок управления направляется текущая глубина, время, парциальное давление газов в тканях для реакции на непредвиденные ситуации.

### Результаты

Адекватность разработанной математической модели и эффективность предложенного алгоритма управления были подтверждены в ходе серии экспериментальных погружений. Оценка результативности разработанной системы осложняется тем, что объект управления представляет собой сложный многофакторный биотехнический процесс, характеризующийся скрытностью протекания ключевых физиологических процессов и трудностью их прямой количественной оценки. Следует отметить, что разработанный интегральный критерий безопасности служит обобщенной мерой потенциального риска, оптимизирующей профиль всплытия для минимизации вероятности осложнений, но не измеряет фактический объем образовавшихся пузырей, не диагностирует клиническую степень ДКБ. Его задача – превентивное снижение риска еще на этапе планирования погружения. В связи с этим, эффективность работы системы управления процессом декомпрессии косвенно оценивалась через анализ динамики индикаторов функционального состояния биологического объекта. В качестве критериев успешности использовались: доплеровский анализ, физиологические и когнитивные показатели.

Для оценки предложенного подхода была проведена серия контрольных погружения с участием одного и того же биологического объекта. Экспериментальная методика предполагала фиксацию всех внешних и внутренних параметров погружения за исключением используемого алгоритма декомпрессии. Постоянные параметры: глубина и время (55 м, 15 мин на дне), дыхательные смеси (21/35, 50, 100), экипировка (траляминат 1 мм, полартек 3 мм, термобелье 2 мм), темп погружения и всплытия (10 м/с), гидрометеорологические условия (вода 9°C, скорость течения), лицо (145 Вт, 109 кг, с незначительными вредными привычками). Сравнение проводилось между стандартным классическим профилем на основе модели градиент-фактора (GF), микропузырьковым профилем модели VPM и профилем, созданным предложенной персонализированной системой управления (New GF) [11]. Результаты доплеровского анализа показаны в Таблице 1. Биологический объект после выхода на поверхность фиксировался в положении лежа, датчик Parks Medical устанавливался на яремную вену, шумомер фиксировался рядом для синхронизации.

Таблица 1 – Результаты доплеровского мониторинга  
Table 1 – Doppler monitoring results

Параметр	GF	VPM	New GF
Количество погружений	5	4	5
Уровень шума (дБ SPL)	Мягкий, редкие всплески: 47–49 дБ	Мягкий, умеренная активность: 53–57 дБ	Мягкий, редкие всплески: 45–47 дБ
Spencer grade	Grade I	Grade II	Grade I
Доминирующая частота сигнала (кГц)	14–16 кГц	9–10 кГц	14–17 кГц
Максимальный радиус пузырька (мкм)	15–18 мкм	25–37 мкм	15–17 мкм

Результаты доплеровского мониторинга показали, что шумы после погружений, осуществленных с использованием разработанной системы управления схожи с шумами классических моделей с присутствием редких щелчков. Амплитуда немного меньше, чем у классической модели GF, тогда как у модели VPM уровень шума возрастал до 57 дБ, что указывает на присутствие более крупных пузырьков, а также согласуется с незначительными симптомами ДКБ. Когнитивные тесты показали в большинстве случаев схожие результаты для всех погружений, небольшое снижение когнитивных функций и пониженное  $SpO_2$  выделяют погружения VPM. Реальные погружения с помощью разработанной системы подтверждают адекватность системы управления и модели декомпрессии.

Траектория спуска и подъема

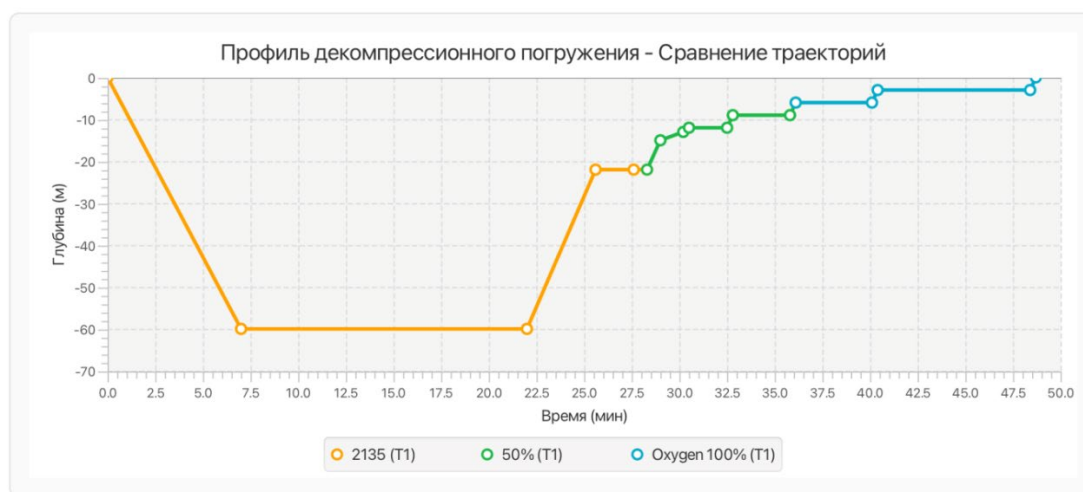


Рисунок 3 – Интерфейс системы управления – профиль погружения  
Figure 3 – Decompression control system interface – dive profile

Разработанное программное обеспечение системы управления процессом декомпрессии автоматизирует процесс сбора и анализа входных данных, что позволило значительно сократить время подготовки декомпрессионного плана по сравнению с ручными расчетами. Фокус системы сделан на этапе предварительного планирования и прогнозирования, где система создает оптимальный персонализированный профиль с учетом физиологических и внешних факторов. Важной особенностью программного обеспечения является модуль имитационного моделирования, предназначенный для проверки устойчивости плана к различным нештатным ситуациям. Рисунок 3 демонстрирует интерфейс системы управления – построенный профиль погружения.

## Заключение

Разработанная система управления процессом декомпрессии показала значительные улучшения качества принимаемых решений при планировании декомпрессии, что являлось основной целью научной работы. Количественными критериями достижения этой цели были: сокращение времени многофакторного анализа параметров декомпрессии, повышение вероятности безопасности будущей декомпрессии, оптимальный подбор режимов декомпрессии. В отличие от существующих программных продуктов по управлению декомпрессией, разработанное программное обеспечение отличается значительным сокращением (в 10 раз) времени комплексного анализа параметров погружений, подбора персонализированной стратегии всплытия. С помощью разработанного математического, алгоритмического и программного обеспечения были смоделированы декомпрессионные погружения на различную глубину с учетом индивидуальных и внешних характеристик. Сравнивая результаты с классическими моделями декомпрессии, в 8 % случаях удалось выявить повышенный риск ДКБ за счет решения задачи минимизации разработанного критерия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Благинин А.А., Жильцова И.И., Емельянов Ю.А. Вопросы декомпрессионной безопасности летного состава. *Военно-медицинский журнал*. 2017;338(7):42–45. Blaginin A.A., Zhiltsova I.I., Emelyanov Yu.A. Issues on decompression safety of flight crew. *Military Medical Journal*. 2017;338(7):42–45. (In Russ.).
2. Сквopin Н.С., Паринов М.В. Модель планирования и прогнозирования декомпрессионных погружений методом корректировок. *Системы управления и информационные технологии*. 2021;(2):85–89. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.84.2.018>  
Skovpin N.S., Parinov M.V. Model for planning and forecasting decompression dives using the correction method. *Control Systems and Information Technology*. 2021;(2):85–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.84.2.018>
3. Aguilera-Arzo M., Alcaraz A., Aguilera V. Heat loss and hypothermia in free diving: Estimation of survival time under water. *American Journal of Physics*. 2003;71(4):333–337. <https://doi.org/10.1119/1.1531581>
4. Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. Москва: Энергия; 1973. 320 с.
5. Moraga C. Introduction to fuzzy logic. *Facta universitatis – series: Electronics and Energetics*. 2005;18(2):319–328. <https://doi.org/10.2298/FUEE0502319M>
6. Schreiner H.R. Mathematical approaches to decompression. *International Journal of Biometeorology*. 1967;11(3):301–310. <https://doi.org/10.1007/BF01426653>
7. Skovpin N., Parinov M. Simulation modeling of gas exchange processes based on physical factors and effects with the implementation that uses big data analysis methods. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2373. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/6/062018>
8. Николаев В.П. Оценка безопасности декомпрессии по количеству и размерам образовавшихся в организме газовых пузырьков. *Известия Академии наук СССР. Серия биологическая*. 1983;(6):822–834.
9. Anuradha, Gupta G. A self explanatory review of decision tree classifiers. In: *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014), 09–11 May 2014, Jaipur, India*. IEEE; 2014. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909245>
10. Bühlmann A.A. *Decompression – Decompression Sickness*. Berlin, Heidelberg: Springer; 1984. 90 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02409-6>

11. Yount D.E., Hoffman D.C. On the use of a bubble formation model to calculate diving tables. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 1986;57(2):149–156.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сковпин Николай Сергеевич**, младший менеджер по развитию бизнес-технологий, Акционерное общество «Райффайзенбанк», Воронеж, Российская Федерация.  
*e-mail:* [kolehandro@gmail.com](mailto:kolehandro@gmail.com)  
ORCID: [0000-0003-3689-4483](https://orcid.org/0000-0003-3689-4483)

**Nikolay S. Skovpin**, Junior Technical Lead, Joint stock company Raiffeisenbank, Voronezh, the Russian Federation.

**Паринов Максим Викторович**, кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой Мехатроники и робототехники, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.  
*e-mail:* [parmax@mail.ru](mailto:parmax@mail.ru)  
ORCID: [0000-0002-7427-5475](https://orcid.org/0000-0002-7427-5475)

**Maksim V. Parinov**, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Acting Head of the Department of Mechatronics and Robotics, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 09.04.2026; одобрена после рецензирования 18.05.2026; принята к публикации 26.05.2026.*

*The article was submitted 09.04.2026; approved after reviewing 18.05.2026; accepted for publication 26.05.2026.*