



ИСТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СПОРТЕ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-4-e202616>

УДК 796.012.1:612.766.1:004

На пути к математической теории спортивной тренировки. Часть 3. Теория адаптации энергетического обмена к физическим нагрузкам Николая Ивановича Волкова

Е. А. Тимме¹ ✉

¹ Ассоциация компьютерных наук в спорте, г. Москва, Российская Федерация

✉ alpdem@yandex.ru

Аннотация

Актуальность. В 1960-1970-е годы в СССР началось активное применение математических методов в спорте. Однако вклад доктора биологических наук, профессора Николая Ивановича Волкова, основоположника научного направления «биоэнергетика спорта» и создателя соответствующей кафедры в ГЦОЛИФК, в построение математической теории адаптации к напряжённой мышечной деятельности до сих пор не систематизирован. Между тем именно он впервые описал кинетику биоэнергетических процессов системой дифференциальных уравнений и ввёл критерии мощности, ёмкости и эффективности механизмов энергообеспечения.

Цели работы – систематизация, интерпретация и сравнительный анализ идей, моделей и результатов Н.И. Волкова, относящихся к теории адаптации и её математическому выражению; выявление структуры предложенной им модели и её места среди других подходов; установление типологии связей между его построениями и современными моделями.

Методы. Проанализированы научные труды и биографические материалы Н.И. Волкова 1965-2013 гг., включая статьи 1965, 1966 и 1968 годов, докторскую диссертацию (1990) и монографию «Биоэнергетика спорта» (2011). Проведено сопоставление с подходами Н.Н. Энгвера, Э. Банистера и В. Н. Селуянова, с современными количественными моделями биоэнергетики мышечной деятельности и типологизация связей между моделями.

Результаты. Систематизирована математическая модель адаптации Н.И. Волкова: 1) компартментная кинетическая модель энергетического обмена, в которой динамика субстрата окисления описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка; 2) биэкспоненциальные уравнения кинетики потребления O_2 при работе и в восстановлении и уравнение динамики лактата в виде разности двух экспонент; 3) система критериев мощности, ёмкости и эффективности для алактатного, гликолитического и аэробного механизмов; 4) аппарат оптимизации тренировочного процесса - целевые функции, зона оптимальных нагрузок и планирование экстремального эксперимента. Подход Н.И. Волкова сопоставлен с подходами Н.Н. Энгвера, Э. Банистера и В. Н. Селуянова и



охарактеризован как механистический, исходящий из кинетики метаболических процессов. Решение уравнений модели сопоставлено с современными представлениями: быстрая и медленная экспоненциальные составляющие кинетики потребления O_2 соответствуют фазе II и медленному компоненту, а расчётное время максимума содержания лактата - наблюдаемому при нагрузке выше максимального устойчивого уровня. Установлено, что Р. Мортон опирался на работу Н.И. Волкова 1966 года, а его трёхкомпонентная модель рассматривается в литературе как развитие моделей Н.И. Волкова. Предложена типология связей: прямое цитирование, структурное совпадение, понятийное соответствие, аналогия и общность объекта. Показано, что понятие критической мощности и ограниченного резерва работы сверх неё соответствует критериям мощности и ёмкости Н.И. Волкова, максимальный устойчивый уровень лактата - представлению о критической нагрузке, а модели восстановления этого резерва аналогичны уравнениям кинетики восстановления.

Заключение. Н.И. Волков создал первую в отечественной спортивной науке целостную математическую теорию адаптации энергетического обмена к физическим нагрузкам, которая завершает ряд из четырёх математических моделей спортивной тренировки, рассмотренных в настоящей серии работ, и даёт в нём механистическое звено - описание на уровне кинетики метаболических процессов. Его уравнения и критерии сохраняют значение как основа современных моделей управления тренировочным процессом, а сформулированный им прогноз - разработка математических моделей адаптации и автоматизированных систем управления физическим состоянием спортсменов - определяет программу исследований и в настоящее время.

Ключевые слова: математическое моделирование тренировочного процесса, теория адаптации, кинетика энергетического обмена, мощность и ёмкость механизмов энергообеспечения, лактат, потребление кислорода, планирование экстремального эксперимента, критическая мощность, биоэнергетика спорта

HISTORY OF INFORMATION TECHNOLOGY IN SPORT

Review article

<https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-4-e202616>

UDC 796.012.1:612.766.1:004

Towards a mathematical theory of athletic training. Part 3. The theory of adaptation of energy metabolism to physical loads by Nikolai Ivanovich Volkov

E. A. Timme¹✉

¹ Russian Association of Computer Science in Sport (RACSS), Moscow, Russian Federation

✉ alpdem@yandex.ru

Abstract

Relevance. In the 1960s–1970s the Soviet Union saw the beginning of the active application of mathematical methods in sport. However, the contribution of Nikolai Ivanovich Volkov, Doctor of Biological Sciences, Professor, founder of the research field of “sport bioenergetics”



and creator of the corresponding department at the GTSOLIFK, to the construction of a mathematical theory of adaptation to strenuous muscular activity has not yet been systematized. Meanwhile, it was he who was the first to describe the kinetics of bioenergetic processes by a system of differential equations and to introduce the criteria of power, capacity and efficiency of the energy supply mechanisms.

Objectives of the work – systematization, interpretation and comparative analysis of the ideas, models and results of N.I. Volkov relating to the theory of adaptation and its mathematical expression; identification of the structure of the model he proposed and of its place among other approaches; establishment of a typology of relations between his constructions and modern models.

Methods. The scientific works and biographical materials of N.I. Volkov of 1965–2013 were analysed, including the papers of 1965, 1966 and 1968, his doctoral dissertation (1990) and the monograph “Sport Bioenergetics” (2011). A comparison was made with the approaches of N.N. Engwer, E. Banister and V.N. Seluyanov and with modern quantitative models of the bioenergetics of muscular activity, and the relations between the models were classified.

Results. The mathematical model of adaptation of N.I. Volkov has been systematized: 1) a compartmental kinetic model of energy metabolism in which the dynamics of the oxidizable substrate is described by a second-order linear differential equation; 2) biexponential equations of the kinetics of O₂ uptake during work and in recovery and an equation of lactate dynamics in the form of a difference of two exponentials; 3) a system of criteria of power, capacity and efficiency for the alactate, glycolytic and aerobic mechanisms; 4) an apparatus for optimizing the training process - target functions, the zone of optimal loads and the design of an extreme experiment. The approach of N.I. Volkov has been compared with the approaches of N.N. Engwer, E. Banister and V.N. Seluyanov and characterized as mechanistic, proceeding from the kinetics of metabolic processes. The solution of the equations of the model has been compared with current views: the fast and slow exponential components of the kinetics of O₂ uptake correspond to phase II and to the slow component, while the calculated time of the maximum lactate content corresponds to that observed at a load above the maximal lactate steady state. It is established that R. Morton relied on the 1966 paper of N.I. Volkov, and his three-component model is regarded in the literature as a development of the models of N.I. Volkov. A typology of relations is proposed: direct citation, structural coincidence, conceptual correspondence, analogy and commonality of the object. It is shown that the notion of critical power and of the limited work reserve above it corresponds to the criteria of power and capacity of N.I. Volkov, the maximal lactate steady state to the notion of a critical load, and the models of reconstitution of this reserve are analogous to the equations of recovery kinetics.

Conclusion. N.I. Volkov created the first integral mathematical theory of the adaptation of energy metabolism to physical loads in Russian sport science, which completes the series of four mathematical models of athletic training considered in the present cycle of papers and supplies in it the mechanistic link - a description at the level of the kinetics of metabolic processes. His equations and criteria retain their significance as a basis for modern models of training process management, while the forecast he formulated - the development of mathematical models of adaptation and automated systems for controlling the physical condition of athletes - defines the research agenda at the present time as well.

Keywords: mathematical modelling of the training process, theory of adaptation, kinetics of energy metabolism, power and capacity of the energy supply mechanisms, lactate, oxygen uptake, design of an extreme experiment, critical power, sport bioenergetics



Введение

Прогнозирование спортивного результата и планирование тренировочного процесса относятся к числу основополагающих задач спортивной науки. Своё видение круга этих задач Н.И. Волков изложил в программной статье «Биология спорта на пороге XXI века», опубликованной в 1997 году [1]. Фундаментальные проблемы современного спорта, на решение которых ориентированы прикладные биологические исследования, он свёл к четырём вопросам: что лимитирует уровень достижений в избранном виде спорта (проблема факторной структуры спортивной работоспособности); какие средства и методы тренировки оказывают наибольшее воздействие на лимитирующие факторы спортивной работоспособности; как лучше всего построить тренировку, чтобы достичь наибольшего прироста спортивного результата (проблема оптимального построения тренировочного процесса); как можно скорректировать и видоизменить воздействие традиционных тренировочных средств за счёт применения дополнительных диетарных, фармакологических, физиотерапевтических и биоклиматических средств [1].

Для настоящей работы принципиальное значение имеет сформулированный в той же статье прогноз на начало XXI века. Н.И. Волков писал, что «важным разделом специальной теории спорта будет разработка математических моделей развития адаптации в процессе спортивной тренировки и создание автоматизированной системы управления физическим состоянием спортсменов» [1]. Этот прогноз задаёт программу, которой, по существу, и посвящена настоящая серия работ.



Рис. 1: Николай Иванович Волков¹

Fig. 1: Nikolai Ivanovich Volkov

Механистическую теорию адаптации в отечественной спортивной науке разработал доктор биологических наук, профессор Николай Иванович Волков, с 1973 года возглавлявший кафедру биохимии и биоэнергетики спорта ГЦОЛИФК. С 1955 по 2005 год он работал со сборными командами СССР и России по видам спорта на выносливость, подготовил 9 докторов и около 80 кандидатов наук, опубликовал более 250 научных работ.

¹Портрет Н.И. Волкова: Спорт-страна.ру - портал по истории спорта. URL: <https://sport-strana.ru/volkov-nikolaj-ivanovich/>



Н.И. Волков является основоположником научного направления «биоэнергетика спорта» и создателем соответствующей кафедры в ГЦОЛИФК. В знак признания его научных заслуг эта кафедра носит его имя: ныне это кафедра биохимии и биоэнергетики спорта им. Н.И. Волкова Российского университета спорта «ГЦОЛИФК»². Созданная им кафедра стала центром подготовки специалистов по биоэнергетике мышечной деятельности, а его ученики и последователи продолжили разработку проблем энергообеспечения и работоспособности спортсменов. Наследие Н.И. Волкова включает поэтому не только совокупность научных результатов, но и сформированную им научную школу³.

Первые две части настоящей работы были отданы феноменологическим моделям, которые связывают внешнюю нагрузку с внешним спортивным результатом и потому описывают тренировочный процесс на уровне входных и выходных переменных, практически не раскрывая внутренних механизмов адаптации [2, 3]. Между тем именно понимание кинетики метаболических процессов позволяет перейти от эмпирических зависимостей к содержательной теории адаптации.

Рассматриваемые модели различаются по своей природе. Феноменологические модели отвечают на вопрос о том, как связать внешнюю нагрузку с внешним результатом, тогда как модель Н.И. Волкова отвечает на вопрос о том, что происходит внутри организма при адаптации к нагрузке. Первый подход является феноменологическим, второй – механистическим. Именно поэтому наследие Н.И. Волкова представляет собой не ещё один вариант уравнения спортивного результата, а принципиально иной уровень описания тренировочного процесса.

Цель работы – систематизация и анализ идей, моделей и результатов Н.И. Волкова, относящихся к теории адаптации и её математическому выражению.

В соответствии с целью сформулированы следующие задачи:

- 1) рассмотреть программную постановку задач спортивной биологии, данную Н.И. Волковым в 1997 году, и её значение для настоящей серии работ;
- 2) изложить постановку задачи о математическом описании энергетического обмена при мышечной деятельности;
- 3) изложить компартментную кинетическую модель и вытекающие из неё уравнения;
- 4) проанализировать систему критериев мощности, ёмкости и эффективности механизмов энергообеспечения;
- 5) рассмотреть математические методы оптимизации тренировочного процесса, включая планирование экстремального эксперимента;
- 6) сопоставить подход Н.И. Волкова с феноменологическими и динамическими моделями, рассмотренными в первых частях настоящей серии;
- 7) рассмотреть модель Н.И. Волкова в свете современных представлений биоэнергетики мышечной деятельности;
- 8) проанализировать биоэнергетическую модель Р. Мортон и его последователей и установить её связь с построениями Н.И. Волкова;
- 9) установить типологию связей между моделью Н.И. Волкова и современными моделями и определить, какие из них правомерно относить к его наследию.

Методами исследования являются анализ и систематизация научных трудов Н.И. Волкова 1965–2013 годов, включая кандидатскую [4] и докторскую [5] диссертации, монографию «Биоэнергетика спорта» [6], работы по кинетике энергетического обмена [7, 8], по кис-

²Кафедра биохимии и биоэнергетики спорта им. Н.И. Волкова. Российский университет спорта «ГЦОЛИФК». URL: https://gtsolifk.ru/obrazovanie/kafedri/biohimii_i_bioenergetiki_sporta_im_ni_volkova

³Волков Николай Иванович. Электронный справочник ФГБУ ФНЦ ВНИИФК. URL: <https://es.vniifk.ru/>



лородному запросу и энергетической стоимости мышечной работы [9], по физиологии дыхания и гипоксической тренировке [10, 11], а также его обобщающую постановку проблем и перспектив биоэнергетики спорта [12] и сопоставление этих трудов с современными количественными моделями биоэнергетики мышечной деятельности.

Постановка задачи о математическом описании адаптации

Основной целью тренировочного процесса в спорте является достижение наибольшего кумулятивного адаптационного эффекта, который выражается в приросте показателей работоспособности и улучшении спортивных достижений [6]. При этом физическая нагрузка на организм спортсмена разнообразна, зависит от множества факторов и имеет целью достижение новых личных рекордов.

В отличие от Н.Н. Энгвера, который рассматривал адаптацию как статистический процесс привыкания к новой интенсивности, Н.И. Волков рассматривал её как процесс изменения кинетических характеристик метаболических систем. Область напряжённой мышечной деятельности была определена им как диапазон нагрузок, уровень энергетического запроса которых превышает значение максимального потребления кислорода (МПК) или соответствующие ему значения критической мощности [6].

Верхняя граница этого диапазона определяется значением максимальной мощности, при которой достигается предельно возможное усиление АТФ-азной активности в работающих мышцах. Нижняя граница соответствует критической мощности, при которой фиксируется максимум потребления O_2 . Между этими границами располагаются несколько диапазонов упражнений с постепенным переходом от преимущественно аэробного к анаэробному гликолитическому, а затем и к анаэробному алактатному способу производства энергии [5].

Количественной основой такого описания служит эргометрический анализ, связывающий мощность и продолжительность работы с её физиологической стоимостью [13].

Ключевая особенность постановки задачи состояла в том, что она формулировалась как задача о динамике, а не о статике. Требовалось получить уравнения, описывающие изменение концентрации метаболитов во времени при заданной мощности работы, что принципиально отличает подход Н.И. Волкова от регрессионных моделей «нагрузка - результат».

Компартментная кинетическая модель энергетического обмена

Исходные постулаты

При разработке математической модели, описывающей кинетику процессов потребления O_2 и образования лактата при напряжённой мышечной деятельности, Н.И. Волков в качестве исходных постулатов выдвинул следующие положения [6, 8]:

1. строгая пропорциональность между количеством выполненной механической работы и размерами использования макроэргических фосфорных соединений во время мышечных сокращений;



2. линейная стимуляция тканевого дыхания за счёт образующихся в ходе мышечных сокращений продуктов гликолиза, то есть линейная зависимость скорости потребления O_2 от количества распавшихся фосфагенов (АТФ и креатинфосфата);
3. прямая пастеревская реакция в работающих мышцах, то есть пропорциональность скорости образования лактата размерам анаэробного (алактатного) ресинтеза АТФ;
4. критический уровень нагрузки, ниже которого гликолиз не проявляется вследствие адекватного снабжения работающих мышц кислородом и величина которого принята равной примерно 50% от индивидуального максимума потребления O_2 ;
5. свободная диффузия лактата из работающих мышц в кровь и другие ткани, а также полное устранение лактата в процессе окисления в сердечной мышце, печени и корковом слое почек.

Эти постулаты носят характер физически содержательных допущений, каждое из которых может быть проверено экспериментально. Эмпирическим обоснованием второго постулата послужило установленное в прямых опытах линейное соотношение между скоростью дефосфорилирования АТФ и уровнем стимуляции тканевого дыхания [6, 8].

Схема модели

Кинетическая модель представляет собой систему обменивающихся между собой компартментов, в которых происходит образование и устранение субстрата окисления. В модели приняты следующие обозначения: W - количество выполненной работы; X_i - концентрация образованного субстрата окисления в различных компартментах; Y - количество окисленного субстрата, эквивалентное количеству потреблённого O_2 ; α - константа пропорциональности, связывающая количество выполненной работы с количеством образованного субстрата окисления; k - константа скорости окисления; P_{ij} - константы скорости диффузии субстрата между отдельными компартментами.

Компартмент 1 (работающие мышцы), где образуется и частично устраняется субстрат окисления, связан посредством диффузии с центральным компартментом 2 (кровь), который объединяет между собой несколько периферийных компартментов. Помимо работающих мышц, в модели были выделены четыре органа, где может устраняться лактат: сердце, печень, корковый слой почек и неработающие мышцы.

Согласно общему правилу кинетики многокомпонентных систем, поведение метаболита, обменивающегося между отдельными компартментами, следует сложной экспоненциальной зависимости, для которой число слагаемых экспоненциалов должно быть равно числу периферических компонентов плюс один центральный компонент. В данном случае это должно было привести к уравнению, состоящему из шести экспоненциальных слагаемых. Однако эмпирически было установлено, что кинетическая кривая следует биэкспоненциальной зависимости. Такое положение вещей обычно трактуется как результат слияния (lumping) нескольких периферических компартментов системы в один общий [14]. Исходя из этого, для вывода уравнений использовалась упрощённая схема метаболизирующей системы, составленная только из двух обменивающихся между собой компартментов.

Схема модели представлена на рисунке 2.

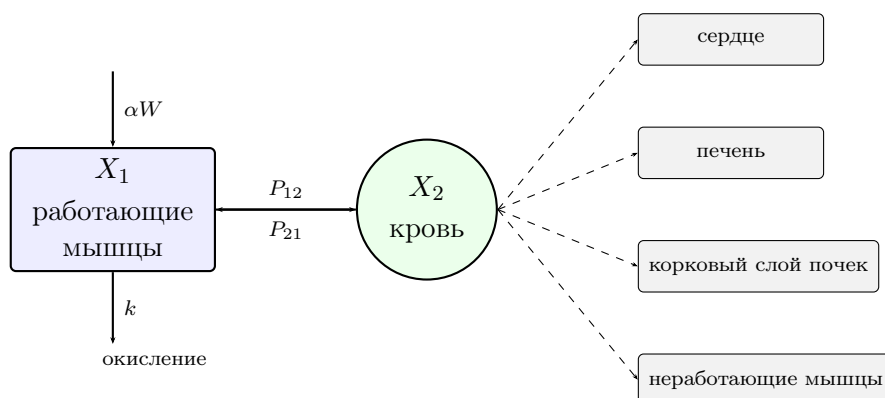


Рис. 2: Компартментная схема кинетической модели Н.И. Волкова: X_1 - компартмент работающих мышц, X_2 - центральный компартмент (кровь), αW - поступление субстрата окисления, пропорциональное выполненной работе, k - константа скорости окисления, P_{12} и P_{21} - константы скорости диффузии; штриховыми стрелками показаны пути устранения лактата

Fig. 2: Compartment scheme of the N.I. Volkov kinetic model: X_1 - working muscle compartment, X_2 - central compartment (blood), αW - input of oxidizable substrate proportional to the work performed, k - oxidation rate constant, P_{12} and P_{21} - diffusion rate constants; dashed arrows show lactate removal pathways

Уравнения кинетики потребления кислорода

Схеме рисунка 2 соответствует система двух линейных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = \alpha W - (k + P_{12}) X_1 + P_{21} X_2, \\ \frac{dX_2}{dt} = P_{12} X_1 - P_{21} X_2, \end{cases}$$

первое из которых описывает приток субстрата окисления в работающие мышцы, его окислительное устранение со скоростью kX_1 и обмен с центральным компартментом, а второе - баланс субстрата в крови. Исключение переменной X_2 , то есть дифференцирование первого уравнения с последующей подстановкой в него второго, даёт уравнение второго порядка (1); его частное решение, отвечающее стационарному режиму, равно $\alpha W/k$, то есть такому уровню субстрата, при котором скорость его образования в точности равна скорости окислительного устранения.

Характеристическое уравнение $\lambda^2 + (k + P_{12} + P_{21}) \lambda + kP_{21} = 0$ при положительных k , P_{12} и P_{21} имеет вещественные отрицательные корни. Действительно, произведение корней $kP_{21} > 0$, а их сумма $-(k + P_{12} + P_{21}) < 0$; дискриминант $(k + P_{12} + P_{21})^2 - 4kP_{21} \geq (k + P_{21})^2 - 4kP_{21} = (k - P_{21})^2 \geq 0$, причём равенство возможно лишь при $P_{12} = 0$ и $k = P_{21}$. Отсюда $k_1 + k_2 = k + P_{12} + P_{21}$ и $k_1k_2 = kP_{21}$, что и обеспечивает устойчивость решения и его выход на стационарный уровень.

Динамика содержания субстрата X_1 в компартменте 1, где происходит его окислительное устранение, описывается линейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами [6, 8]:



$$\frac{d^2 X_1}{dt^2} + (k + P_{12} + P_{21}) \frac{dX_1}{dt} + k P_{21} X_1 = P_{21} \alpha W. \quad (1)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$X_1 = -\alpha_1 e^{-k_1 t} - \alpha_2 e^{-k_2 t} + \alpha_3, \quad (2)$$

где α_i - постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий, k_1 и k_2 - корни соответствующего характеристического уравнения, при этом $|k_1| > |k_2|$. Обозначения α_i в решении не следует смешивать с константой пропорциональности α в уравнении (1): размерность постоянных интегрирования совпадает с размерностью X_1 . В начальный момент работы при $t = 0$ имеет место равенство $\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_2$, и уравнение принимает вид

$$X_1 = \alpha_1 (1 - e^{-k_1 t}) + \alpha_2 (1 - e^{-k_2 t}). \quad (3)$$

В период восстановления, когда W становится равным нулю, уравнение приобретает вид

$$\frac{d^2 X_1}{dt^2} + (k + P_{12} + P_{21}) \frac{dX_1}{dt} + k P_{21} X_1 = 0, \quad (4)$$

а его решение записывается как

$$X_1 = b_1 e^{-k'_1 t} + b_2 e^{-k'_2 t}. \quad (5)$$

Отметим одну особенность строгого решения, существенную для понимания границ модели. Коэффициенты уравнения (4) совпадают с коэффициентами уравнения (1): при $W = 0$ меняется только правая часть, а значит, корни характеристического уравнения остаются прежними и в строгом решении $k'_1 = k_1$, $k'_2 = k_2$. Выделение самостоятельных констант k'_1 и k'_2 представляет собой поэтому не следствие уравнений, а эмпирическое обобщение: скорость доставки O_2 , температура тканей и уровень катехоламинов после работы отличаются от таковых в её начале, и кривые восстановления аппроксимируются своими значениями констант. Иными словами, уравнения (1) и (4) задают линейную рамку, а расхождение констант фиксирует физиологические границы её применимости.

Поскольку скорость потребления O_2 в организме человека равна скорости окислительных превращений в тканях, для перехода от уравнений, описывающих изменения субстрата окисления, к выражениям для скорости потребления O_2 , следует умножить обе части уравнений на значение константы скорости окисления k . В этом случае для скорости потребления O_2 во время упражнения можно записать

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{O_2}^1 (1 - e^{-k_1 t}) + \dot{V}_{O_2}^2 (1 - e^{-k_2 t}), \quad (6)$$

а для скорости потребления O_2 в период восстановления

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{O_2}^1 e^{-k'_1 t} + \dot{V}_{O_2}^2 e^{-k'_2 t}, \quad (7)$$

где $\dot{V}_{O_2}^1$ и $\dot{V}_{O_2}^2$ - значения составляющих фракций общего потребления O_2 в стационарном режиме работы или в начальный момент восстановления; k_1 , k_2 и k'_1 , k'_2 - константы скорости потребления O_2 во время работы и в период восстановления соответственно; t - время работы или восстановления.

Суммарное количество O_2 , потреблённого за время упражнения, определяется выражением



$$\Sigma V_{O_2} = \dot{V}_{O_2}^1 \left(t + \frac{e^{-k_1 t}}{k_1} - \frac{1}{k_1} \right) + \dot{V}_{O_2}^2 \left(t + \frac{e^{-k_2 t}}{k_2} - \frac{1}{k_2} \right). \quad (8)$$

Уравнение, описывающее динамику содержания лактата в крови, имеет вид

$$L_t = L_0(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}), \quad (9)$$

где L_t - прирост концентрации лактата в крови над уровнем покоя в любой момент после начала работы; L_0 - амплитудный коэффициент лактатной кривой, имеющий размерность концентрации; λ_1 и λ_2 - константы скорости накопления и устранения лактата, причём $\lambda_1 > \lambda_2$. Фактически достигаемый максимум концентрации не совпадает с L_0 и вычисляется по формуле (10).

Физиологический смысл констант

Принципиальное значение имеет интерпретация входящих в уравнения констант. Величина k_1 характеризует скорость развёртывания аэробного процесса и определяется преимущественно скоростью доставки O_2 к работающим мышцам. Величина k_2 отражает скорость более медленных процессов, связанных с кинетикой метаболических превращений в периферических тканях. Соотношение $|k_1| > |k_2|$ означает, что быстрая компонента определяет начальный участок кривой потребления O_2 , а медленная - её выход на стационарный уровень.

Константы λ_1 и λ_2 характеризуют соответственно скорость накопления и скорость устранения лактата. Именно это различие скоростей делает зависимость концентрации лактата от времени немоной: концентрация сначала возрастает, достигая максимума, а затем снижается по мере преобладания процессов устранения. Максимальное накопление лактата в крови определяется выражением

$$\max L_t = L_0 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}} - L_0 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}}, \quad (10)$$

а время достижения максимальной концентрации лактата в крови равно

$$t_{\max} = \frac{\log_e \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (11)$$

Эти выражения позволили связать количественные показатели лактатной кривой с константами кинетики и перейти от качественного описания динамики лактата к количественному [8].

Численное решение уравнений (6), (7), (9) и (10) при характерных для тяжёлой мышечной работы значениях констант приведено на рисунке 3. Работа выполняется в течение 300 с; для кинетики потребления O_2 приняты $\tau_1 = 1/k_1 \approx 22$ с и $\tau_2 = 1/k_2 \approx 133$ с, что даёт выход на уровень 3,4 л/мин, для лактатной кривой - $\lambda_1 = 0,0045$ с⁻¹ и $\lambda_2 = 0,0010$ с⁻¹, что даёт максимум концентрации около 12 ммоль/л примерно через 7 мин после начала работы.

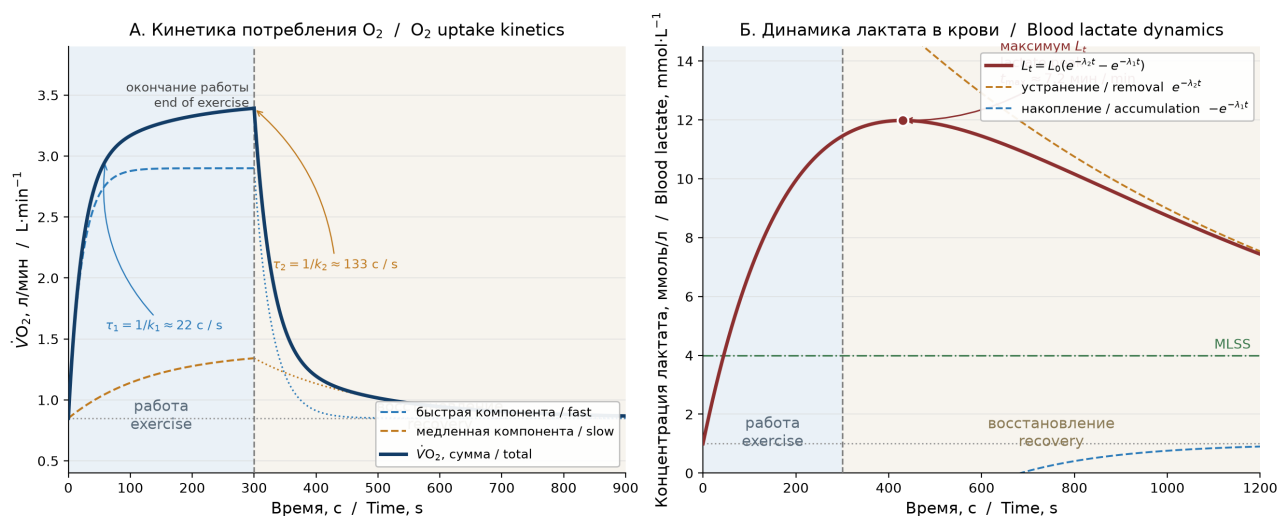


Рис. 3: Решение уравнений кинетической модели Н.И. Волкова. А - биэкспоненциальная кинетика потребления O_2 при работе (0-300 с) и в период восстановления; показаны быстрая компонента с постоянной времени $\tau_1 = 1/k_1$ и медленная с $\tau_2 = 1/k_2$. Б - динамика концентрации лактата в крови как разность двух экспонент с максимумом в точке t_{max} ; штрихпунктиром показан уровень максимального устойчивого состояния (MLSS)

Fig. 3: Solution of the equations of the N.I. Volkov kinetic model. A - biexponential O_2 uptake kinetics during exercise (0-300 s) and recovery; the fast component with time constant $\tau_1 = 1/k_1$ and the slow one with $\tau_2 = 1/k_2$ are shown. B - blood lactate dynamics as a difference of two exponentials with a maximum at t_{max} ; the dash-dotted line marks the maximal lactate steady state (MLSS)

Как следует из рисунка 3, А, суммарная кривая потребления O_2 не является моноэкспоненциальной: быстрая компонента обеспечивает основной прирост в первые полторы-две минуты, после чего кривая продолжает медленно повышаться за счёт второй компоненты. Именно это свойство модели и делает её биэкспоненциальной. Из рисунка 3, Б, видно, что максимум лактатной кривой не совпадает ни с началом, ни с окончанием работы: он достигается в период восстановления, когда скорость устранения лактата сравнивается со скоростью его поступления в кровь.

Сопоставление этого решения с современными данными обнаруживает прямое соответствие. Быстрая компонента с постоянной времени $\tau_1 = 1/k_1$ порядка 20-30 с отвечает современной фазе II кинетики потребления O_2 , а медленная с $\tau_2 = 1/k_2$ порядка 100-200 с - медленному компоненту потребления кислорода, возникающему при работе выше лактатного порога [15, 16, 17]. Аналогичным образом максимум лактатной кривой, вычисляемый по формулам (10) и (11), содержательно соответствует современному представлению о максимальном устойчивом уровне лактата: ниже этого уровня концентрация лактата стабилизируется, выше - прогрессивно нарастает [18].

Экспериментальная проверка

Проверка модели проводилась на 175 спортсменах высокой квалификации в возрасте от 17 до 32 лет. Испытуемые выполняли на велоэргометре серии упражнений с установкой на достижение максимальной частоты педалирования при градации продолжительности усилий 3, 5, 6, 9, 10, 12 и 15 с. Наряду с этим проводились исследования кинетики лактата



и потребления кислорода при работе на велоэргометре, в плавании и в беге [6, 8].

Кинетика потребления O_2 изучалась в специальных опытах, в которых у четырёх испытуемых при выполнении работы на велоэргометре и на дорожке стационара непрерывно регистрировали потребление O_2 методом частых заборов выдыхаемого воздуха в мешки (через каждые 30 с) с последующим анализом в аппарате Холдена. Параллельно брали пробы крови для определения концентрации лактата по методу Баркера и Суммерсона [8].

В качестве тестирующих нагрузок использовали динамические упражнения трёх уровней мощности: умеренные упражнения с уровнем O_2 -запроса около 2,0 л/мин, при которых не отмечалось сколь-нибудь значительного образования лактата (её концентрация в крови не превышала 20-30 мг%); тяжёлые упражнения с уровнем O_2 -запроса от 2,0 до 7,0 л/мин, в ходе которых наблюдалось накопление лактата в крови до 90-120 мг%; и изнуряющие упражнения, у которых уровень O_2 -запроса превышал 7,0 л/мин, а накопление лактата в крови достигало предельно высоких значений, превышающих 200 мг%. Время выполнения упражнений в зависимости от их тяжести составляло от 30 с до 36 мин [8].

Уравнения (6)-(11) были проверены на соответствие экспериментальным данным в широком диапазоне мышечных усилий, существенно различающихся по уровню энергетического запроса. Полученные результаты подтвердили пригодность биэкспоненциальной аппроксимации как для кривых потребления O_2 , так и для кривых содержания лактата в крови. При умеренной работе кривая потребления O_2 следовала однокомпонентной экспоненциальной зависимости, что соответствует постулированному в кинетической модели однозначному характеру аэробного обмена при адекватном снабжении мышц кислородом [8].

Проверялась не только форма кривых, но и численные значения их параметров. Анализ показал, что константы скорости накопления и устранения лактата, а также значения составляющих фракций потребления O_2 обладают высокой воспроизводимостью у одного и того же спортсмена и закономерно изменяются под влиянием тренировки, что позволяет применять их в целях сравнения разных испытуемых [6, 8].

Критерии мощности, ёмкости и эффективности

Общая постановка

Второй составляющей теории адаптации, разработанной Н.И. Волковым, является система количественных критериев, позволяющих охарактеризовать каждый механизм энергообеспечения тремя независимыми параметрами [5]. Такими параметрами были предложены мощность, ёмкость и эффективность.

- **Мощность** - максимальная скорость преобразования энергии в данном метаболическом процессе, то есть предельная скорость высвобождения энергии в единицу времени.
- **Ёмкость** - общее количество энергии, которое может быть получено в данном процессе за счёт имеющихся субстратных резервов.
- **Эффективность** - отношение количества полезной механической работы к общим затратам метаболической энергии, то есть коэффициент полезного действия.

Такое разделение принципиально важно, поскольку оно позволяет разграничить три разные стороны адаптации, которые в феноменологических моделях оказываются



неразличимыми. Увеличение мощности механизма не обязательно сопровождается ростом его ёмкости, и наоборот. Соответственно, и тренировочные воздействия, направленные на развитие этих качеств, должны различаться.

Критерии для отдельных механизмов

Для алактатного анаэробного механизма мощность оценивается как максимальная алактатная мощность, регистрируемая в упражнениях предельной продолжительности 3-5 с. Ёмкость определяется внутримышечными запасами АТФ и креатинфосфата, эффективность - коэффициентом полезного действия, зависящим от активности миозиновой АТФ-азы и креатинфосфокиназы, температуры и степени закисления мышечного волокна.

Мощность механизма анаэробного гликолиза оценивается по результатам упражнений с предельной продолжительностью 30-60 с, типичным примером которых служит Вингейтский тест. Ёмкость гликолитического механизма характеризуется количеством энергии, которое может быть получено за счёт анаэробного распада углеводов.

Аэробные возможности оцениваются по величине максимального потребления кислорода, а также по мощности на уровне анаэробного порога. Ёмкость аэробного механизма связана с запасами гликогена и липидов в мышцах.

Соотношение показателей мощности для трёх механизмов оказывается весьма характерным. Максимальная мощность алактатного процесса примерно втрое превышает мощность аэробного, тогда как время достижения максимума, напротив, максимально для аэробного механизма и составляет 2-3 мин [6]. Именно это несоответствие между скоростью развёртывания и уровнем предельной мощности лежит в основе последовательного включения источников энергии при мышечной работе.

Динамика критериев в многолетней тренировке

Особый интерес представляет установленная Н.И. Волковым закономерность изменения этих критериев в процессе многолетней подготовки. Было показано, что прирост биоэнергетических показателей подчиняется определённой последовательности. Первоначально улучшение происходит за счёт показателей мощности биоэнергетических процессов, затем - за счёт показателей биоэнергетической ёмкости, и на заключительном этапе тренировки - за счёт улучшения биоэнергетических параметров эффективности [5].

Эта закономерность имеет прямое практическое значение для планирования многолетней тренировки. Она указывает на то, что попытка целенаправленного развития эффективности на ранних этапах подготовки преждевременна, поскольку соответствующие адаптационные резервы ещё не подготовлены предшествующим развитием мощности и ёмкости.

Количественное выражение этой закономерности было получено при анализе показателей анаэробной мощности, ёмкости и эффективности у спортсменов различных специализаций. Наибольшие темпы прироста и наименьшие сроки их достижения были отмечены для показателей анаэробной мощности. Наименьшие темпы прироста и наиболее длительные сроки достижения характерны для показателей гликолитической анаэробной ёмкости и аэробной эффективности.



Математические критерии оптимизации тренировочного процесса

Целевые функции

Третьей составляющей теории является математический аппарат оптимизации тренировочного процесса. Одним из методов строгого количественного анализа воздействия применяемых средств является изучение так называемых целевых функций, в которых изменения избранного критерия эффективности тренировки сопоставляются с величиной прилагаемого стимула, то есть с объёмом выполненной тренировочной работы [6].

По направленности биоэнергетических изменений в организме применяемые средства и методы тренировки были подразделены на четыре категории:

- нагрузки преимущественно аэробного воздействия, интенсивность которых не превышает значений порога анаэробного обмена;
- нагрузки смешанного аэробно-анаэробного воздействия, среди которых выделяются нагрузки субкритической интенсивности и нагрузки надкритической интенсивности, превышающие значение критической мощности;
- нагрузки анаэробного гликолитического воздействия, при которых достигаются наибольшие сдвиги в сфере анаэробного обмена;
- нагрузки анаэробного алактатного воздействия, выполняемые с интенсивностью, близкой к значениям максимальной анаэробной мощности.

Анализ целевых функций для бегунов на длинные дистанции показал, что под влиянием суммарного объёма нагрузок и объёма нагрузок преимущественно аэробного воздействия прирост показателей аэробной мощности обнаруживает линейное увеличение. Линейный характер зависимости имеет место и в случае нагрузок смешанного аэробно-анаэробного воздействия. В то же время при увеличении объёма выполняемых нагрузок гликолитического анаэробного воздействия значения показателей максимальной аэробной мощности экспоненциально понижаются.

Зона оптимальных нагрузок

Форма целевой функции позволяет не только описать, но и оптимизировать тренировочный процесс. Наличие строгой пропорциональности между увеличением объёмов выполняемых тренировочных нагрузок и улучшением биоэнергетических критериев работоспособности указывает на то, что пределы адаптации ещё не достигнуты и поиск путей увеличения объёма тренировочной работы для данного вида нагрузок может быть продолжен. Напротив, снижение показателей прироста биоэнергетической функции указывает на необходимость ограничения применения средств данной направленности.

Для формального определения оптимального объёма Н.И. Волков предложил использовать параболическую зависимость типа [12]

$$\Delta R = a_0 + a_1 h_i + a_2 h_i^2, \quad (12)$$

где ΔR - прирост избранного критерия работоспособности, h_i - объём нагрузки определённой направленности, a_0, a_1, a_2 - эмпирические константы. Такая зависимость



имеет выраженный экстремум, что позволяет по проекции зависимой переменной на плоскость независимой переменной установить область его расположения.



Рис. 4: Кривая зависимости «доза - эффект» в теории адаптации Н.И. Волкова: слева от порога нагрузка неэффективна, в диапазоне эффективных нагрузок прирост тренируемой функции растёт, приближаясь к экспоненте с насыщением, на пределе адаптации прирост прекращается, а запредельная нагрузка приводит к срыву адаптации

Fig. 4: Dose-effect curve in the adaptation theory of N.I. Volkov: below the threshold the load is ineffective; within the range of effective loads the gain in the trained function rises, approaching a saturating exponential; at the adaptation limit the gain ceases, and a supramaximal load leads to a breakdown of adaptation

Графически эта закономерность, объединяющая представления о пороге и пределе адаптации, представлена на рисунке 4.

Вычисляемый с использованием метода наименьших квадратов интервал стандартной ошибки параболического уравнения позволяет установить так называемую зону оптимальных нагрузок (ЗОН). Практическое значение этого понятия состоит в том, что оно переводит задачу планирования из области интуиции в область количественного расчёта, задавая не единственное «оптимальное» значение объёма, а интервал, внутри которого приросты показателя работоспособности статистически неразличимы.

Практическая реализация этого подхода, в которой объём нагрузки нормируется через показатели энергетической стоимости упражнения, описана в работе [19].

В данном случае применяется тот же математический аппарат (метод наименьших квадратов), что и в феноменологических моделях спортивного результата [20]. Различие состоит в предмете описания: в феноменологических моделях параболическая зависимость связывает результат с интенсивностью и объёмом на уровне целостного организма, тогда как у Н.И. Волкова она связывает прирост отдельной биоэнергетической функции с объёмом нагрузки определённой направленности.



Планирование экстремального эксперимента

Отдельного рассмотрения заслуживает работа Н.И. Волкова 1968 года, выполненная совместно с В.М. Зацюрским, Е.А. Разумовским и В.Н. Черемисиновым и посвящённая применению математической теории планирования экспериментов для поиска оптимальной методики тренировки [21]. В ней речь идёт не о построении модели, а о методе экспериментального поиска, и потому она дополняет описанные выше средства оптимизации с другой стороны.

Отправным пунктом работы стал количественный анализ сложности задачи. Было показано, что тренировочная нагрузка зависит, как минимум, от пяти характеристик: скорости бега, длины отрезков, продолжительности интервалов отдыха, характера отдыха (активный или пассивный) и числа повторений. Если ограничиться даже шестью уровнями варьирования каждого фактора, полный перебор потребовал бы $6^5 = 15\,625$ опытов. Отсюда был сделан вывод, что попытки построить научно обоснованную методику тренировки, опираясь на результаты большого числа так называемых педагогических экспериментов, по существу бесперспективны.

Взамен предлагался математический аппарат теории планирования экстремальных экспериментов. Независимые переменные $x_1, x_2, \dots, x_k$ рассматриваются как факторы, зависимая переменная

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (13)$$

называется функцией отклика, а её геометрический образ - поверхностью отклика. Поиск экстремума осуществляется методом крутого восхождения: на каждом шаге ставится небольшой факторный эксперимент, по его результатам строится локальная линейная аппроксимация поверхности отклика, определяющая направление следующего шага, а вблизи экстремума, где линейного приближения становится недостаточно, поверхность описывается полиномами более высоких степеней [21].

В качестве показателей отклика использовались характеристики, непосредственно связанные с биоэнергетикой нагрузки: общий O_2 -долг, его алактатная и лактатная фракции, пульсовой долг, быстрая и медленная составляющие «излишка» лёгочной вентиляции, а также суммарный «излишек» CO_2 , вычисляемый как

$$\text{Excess } V_{CO_2} = V_{CO_2} - R_{\text{покоя}} \cdot V_{O_2}. \quad (14)$$

Анализ выдыхаемого воздуха проводился на аппарате Холдена, газовые объёмы измерялись спирометром, частота сердечных сокращений регистрировалась физиографом.

Было проведено две серии экспериментов. В первой, лабораторной, работа выполнялась на велоэргометре при мощности от 80 до 100% предельной интенсивности, продолжительности упражнения 0,5 и 1,5 мин и варьировании числа повторений и интервалов отдыха. Во второй серии, проведённой на стадионе, факторами служили длина отрезков (200, 400 и 600 м), интервалы отдыха (3 и 11 мин) и число повторений (2 и 4).

Основные результаты состояли в следующем. Наиболее показательными показателями срочного тренировочного эффекта оказались общий O_2 -долг и его лактатная фракция, причём наибольшее влияние на них оказывали интервалы отдыха (уровень значимости 88-95%). В лабораторном эксперименте в качестве основного фактора, определяющего размеры анаэробного долга, выделилась мощность упражнения. В опытах с бегом было обнаружено отрицательное влияние взаимодействия «длина дистанции $\times$ число повторений»: увеличение числа повторений на длинных отрезках приводило к снижению величины O_2 -долга. Одним из оптимальных вариантов тренировочной нагрузки по воздействию на



сердечно-сосудистую систему был признан следующий: дистанция 400 м, интервал отдыха 7 мин, скорость предельная, три повторения [21].

Авторы прямо указали и на ограничение метода: воспроизводимость показателей анаэробного обмена у одних и тех же испытуемых оказалась невысокой, а индивидуальные различия в реакции на одну и ту же нагрузку - весьма значительными. Этот вывод согласуется с современными представлениями о вариабельности физиологических ответов и объясняет, почему поиск оптимальных режимов приходится вести в индивидуальном порядке.

Линия поиска оптимальных режимов интервальной работы была продолжена самим Н.И. Волковым: в более поздних трудах результаты такого поиска обобщены в виде теории и практики интервальной тренировки [22].

Значение работы 1968 года для настоящего рассмотрения состоит в том, что она замыкает контур управления тренировкой: кинетическая модель даёт объяснение того, что происходит в организме, критерии мощности, ёмкости и эффективности дают язык для постановки цели, а планирование экстремального эксперимента даёт метод её достижения при минимальном числе опытов.

Сопоставление подходов Н.Н. Энгвера, Э. Банистера, В.Н. Селуянова и Н.И. Волкова

Сопоставление четырёх рассмотренных подходов позволяет выявить как их взаимодополняющий характер, так и принципиальные различия (таблица 1).

Как следует из таблицы, все четыре подхода описывают один и тот же объект, но на разных уровнях детализации и на разных временных масштабах. Модель Н.Н. Энгвера [23] отвечает на вопрос о том, как связать наблюдаемые входные и выходные переменные. Модель Э. Банистера [24] описывает динамику интегральных состояний организма. Модель В. Н. Селуянова [25] связывает эти состояния с перестройкой структур мышечного волокна. Модель Н.И. Волкова вскрывает метаболические механизмы, лежащие в основе этих состояний, и задаёт для них кинетическую шкалу.

Особое место в этом ряду занимает модель В. Н. Селуянова, непосредственным образом продолжая линия Н.И. Волкова. Предложенные Н. И. Волковым критерии мощности, ёмкости и эффективности были в ней отнесены к конкретным структурам мышечного волокна - митохондриальному и миофибриллярному объёму, буферной ёмкости, соотношению типов волокон, а адаптация была представлена как результат конкуренции процессов синтеза и распада этих структур [25]. Тем самым критерии Н.И. Волкова получили морфологическую интерпретацию, а его кинетическая модель - структурное обоснование.

Подход Н.И. Волкова позволяет содержательно интерпретировать параметры других моделей. Так, постоянная времени T в уравнении привыкания Н.Н. Энгвера может быть сопоставлена с константой скорости k_2 в кинетической модели: обе величины характеризуют скорость выхода системы на новый стационарный уровень. Аналогично, времена τ_1 и τ_2 в модели Э. Банистера соответствуют характерным временам развёртывания и восстановления биоэнергетических процессов, а характерное время перестройки клеточных структур в модели В. Н. Селуянова - величине $1/k_2$, определяющей выход биоэнергетической системы на новый стационарный уровень.



Таблица 1: Сопоставление подходов к математическому описанию тренировочного процесса
Table 1: Comparison of approaches to the mathematical description of the training process

Характеристика	Н.Н. Энгвер	Э. Банистер	В. Н. Селуянов	Н.И. Волков
Тип модели	статистическая (закон распределения)	динамическая (свёртка, сглаживание)	структурно-морфологическая (имитационная)	кинетическая (компарментная)
Входные переменные	интенсивность, объём	тренировочный импульс	режим и объём силовой работы	мощность работы
Основное уравнение	$R = J \pm \sqrt{a_0 + a_1 \ln N}$	$p(t) = k_1 f(t) - k_2 g(t)$	$\dot{m} = a \sigma(t) - b m$	$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}^1(1 - e^{-k_1 t}) + \dot{V}^2(1 - e^{-k_2 t})$
Внутренние механизмы	не рассматриваются	тренированность и утомление	митохондрии, миофибриллы, тип волокон	мощность, ёмкость, эффективность
Горизонт планирования	микроциклы	месяцы и годы	недели, мезоциклы	этапы подготовки
Масштаб процесса	месяцы и годы	недели и месяцы	недели	секунды и минуты
Ключевое понятие	привыкание	баланс «тренированность - утомление»	перестройка мышечного волокна	константы скорости метаболизма

Принципиальное различие между подходами состоит в трактовке адаптации. У Н.Н. Энгвера привыкание рассматривается как статистический феномен: адаптационные регуляторы поднимают максимальные возможности организма так, чтобы создать примерно 50% запас надёжности по сравнению с обычной, средней работой. У Э. Банистера адаптация выступает как результат конкуренции тренированности и утомления, у В. Н. Селуянова - как перестройка структур мышечного волокна, а у Н.И. Волкова - как изменение кинетических констант метаболических процессов. Первые три трактовки позволяют предсказать результат, последняя - объяснить его.

Обсуждение

Систематизация наследия Н.И. Волкова позволяет выявить несколько особенностей его подхода, которые отличают его от зарубежных аналогов того же периода.

Во-первых, модель Н.И. Волкова является одной из первых в мировой практике попыток построить математическое описание энергетического обмена при мышечной деятельности, исходя из физиологических механизмов, а не из эмпирических зависимостей. Работа 1966 года [8] предшествовала публикации классической модели Э. Банистера [24] и была выполнена независимо от неё.

Во-вторых, предложенная Н.И. Волковым система критериев мощности, ёмкости и эффективности сохраняет своё значение до настоящего времени. Современные представления о физиологических детерминантах выносливости, включая понятие максимальной скорости накопления лактата (VLa_{max}) и представление о критической мощности и конечной работе W' , являются по существу дальнейшим развитием этой системы. Так, мощность гликолитического механизма в трактовке Н.И. Волкова близка по смыслу к современному показателю VLa_{max} , а ёмкость анаэробных механизмов - к величине W' .



В-третьих, важным представляется разграничение мощности и ёмкости как независимых характеристик. Это разграничение позволяет объяснить, почему увеличение объёма нагрузок гликолитической направленности может приводить к экспоненциальному снижению показателей аэробной мощности: соответствующие адаптационные резервы перераспределяются между механизмами, а не накапливаются линейно.

Вместе с тем подход имеет ограничения. Основное из них состоит в том, что компартментная модель описывает организм как совокупность однородных метаболических пространств, не учитывая гетерогенность мышечных волокон. В частности, невозможность перехода молекул АТФ или креатинфосфата из одного мышечного волокна в другое, из одной мышцы в другую означает, что при выполнении упражнений с использованием локальных мышечных групп оценки мощности, ёмкости и эффективности будут иными [25].

Кроме того, значения коэффициента полезного действия, используемые для оценки эффективности, обладают значительной вариабельностью в зависимости от техники выполнения упражнения. При педалировании с темпом более 150 об/мин у велосипедистов КПД может достигать 37%, тогда как при нерациональной технике он может снижаться до 10% [25]. Это затрудняет точное определение эффективности как индивидуальной характеристики.

Часть констант кинетической модели определяется методом подбора из экспериментальных данных и потому не является полностью независимой от условий эксперимента. Тем не менее воспроизводимость этих констант у одного и того же спортсмена оказалась достаточно высокой, что подтверждает их содержательный смысл [6].

Вопрос о связи теории адаптации Н.И. Волкова с современными подходами к управлению тренировочным процессом требует отдельного обсуждения. Развитие систем мониторинга, основанных на носимых датчиках, позволило перейти к непрерывной регистрации частоты сердечных сокращений, мощности и других показателей. Это создаёт предпосылки для практического применения кинетических моделей в режиме реального времени: имея оценки констант k_1 и k_2 , можно прогнозировать динамику восстановления после отдельной тренировки и планировать интервалы отдыха.

Для этого не требуется прямого измерения метаболических показателей. Поскольку скорость потребления O_2 связана с частотой сердечных сокращений, а динамика лактата может быть косвенно оценена по данным о мощности работы, уравнения кинетики допускают оценку по доступным в практике измерений величинам. Именно в этом направлении, по-видимому, и лежит основное перспективное приложение наследия Н.И. Волкова.

Модель Н.И. Волкова в свете современных взглядов

Рассмотренные выше уравнения кинетики потребления O_2 и образования лактата были получены Н.И. Волковым более полувека назад. Естественно поэтому поставить вопрос о том, в каком отношении они находятся к современным представлениям о биоэнергетике мышечной деятельности и в какой мере их содержание сохранилось в современной спортивной науке.

Идея описания энергетического обмена через систему обменивающихся между собой компартментов не только не устарела, но и получила дальнейшее развитие. Именно на этой идее построены современные гидравлические модели биоэнергетики мышечной деятельности, к рассмотрению которых мы перейдём в следующем разделе. Здесь же важно указать на содержательное совпадение ряда результатов.



Первое совпадение касается формы кривой потребления кислорода. Полученное Н.И. Волковым биэкспоненциальное уравнение (6) с двумя фракциями общего потребления O_2 соответствует современному представлению о кинетике потребления кислорода, включающем быструю (кардиодинамическую) и медленную (метаболическую) компоненты. В современной физиологии принято описывать эту кинетику выражением с двумя экспоненциальными членами, что фактически воспроизводит структуру уравнения Н.И. Волкова [15, 16].

Современные исследования показали, что при работе выше анаэробного порога кинетика потребления O_2 переходит от моноэкспоненциальной зависимости к биэкспоненциальной, то есть именно к той форме, которую постулировал Н.И. Волков [26, 27]. Это явление получило в современной литературе название медленного компонента потребления кислорода и рассматривается как один из центральных механизмов, ограничивающих работоспособность [17]. Медленный компонент по своему смыслу соответствует той дополнительной фракции потребления кислорода, которая в модели Н.И. Волкова связана с окислительным устранением лактата. Иначе говоря, обе модели объясняют дополнительный прирост потребления кислорода накоплением лактата и его последующим окислением.

Второе совпадение касается трактовки лактата. Уравнение (9) описывает динамику лактата как разность двух экспонент, одна из которых отвечает за накопление, а другая за устранение. Такая форма записи является в настоящее время общепринятой и лежит в основе современных моделей лактатной кинетики. Расчёт максимальной концентрации лактата по формулам (10) и (11) по существу совпадает с современным подходом, в котором максимальный устойчивый уровень лактата (maximal lactate steady state, MLSS) выступает в качестве одной из ключевых характеристик работоспособности [18].

Третье совпадение имеет наиболее принципиальный характер. Система критериев мощности, ёмкости и эффективности, предложенная Н.И. Волковым, воспроизводится в современной концепции критической мощности. В этой концепции фигурируют две основные характеристики энергообеспечения: критическая мощность (CP), то есть максимальная мощность, которая может поддерживаться неограниченно долго, и конечная работа выше критической мощности (W'), то есть количество работы, которое может быть выполнено за счёт анаэробных источников [18, 28]. Нетрудно видеть, что критическая мощность соответствует по смыслу критерию мощности в трактовке Н.И. Волкова, а величина W' - критерию ёмкости анаэробных механизмов.

Отметим и одно важное различие. В концепции критической мощности аэробный механизм рассматривается как неограниченный по ёмкости, но ограниченный по скорости, тогда как анаэробный, напротив, считается ограниченным по ёмкости, но не по скорости [26]. У Н.И. Волкова аналогичное противопоставление выражено через различие временных характеристик: алактатный механизм обладает наибольшей мощностью и наименьшей ёмкостью, аэробный - наименьшей мощностью и наибольшей ёмкостью, а гликолитический занимает промежуточное положение. Оба подхода описывают одну и ту же закономерность, но выражают её в разных терминах.

Современные представления о критической мощности позволяют содержательно уточнить и один из критериев Н.И. Волкова. Если в исходной трактовке критическая мощность отождествлялась с полной стабилизацией физиологических реакций, то современные исследования показали, что устойчивое состояние может достигаться лишь в ограниченном диапазоне показателей, тогда как другие продолжают медленно изменяться [18, 29]. Это означает, что граница между аэробной и анаэробной зонами не является абсолютно резкой, а представляет собой переходную область, внутри которой происходит постепенная смена



доминирующего механизма энергообеспечения.

Ряд положений теории Н.И. Волкова вошёл в современную спортивную науку в виде самостоятельных понятий, без прямой ссылки на исходную работу. К их числу относится, в частности, представление о том, что энергетический запрос нагрузок верхней зоны напряжённой мышечной деятельности превышает возможности аэробного механизма и потому требует обязательного участия анаэробных источников. Это положение, сформулированное Н.И. Волковым как определение области напряжённой мышечной деятельности, лежит в основе современных представлений о верхней границе устойчивого состояния. В современной литературе тот же критерий формулируется как условие превышения мощностью работы значения критической мощности, при котором становится неизбежным прогрессирующее накопление метаболитов и ограничение времени работы [18, 30].

Биоэнергетическая модель Мортонa и его последователей

Второе направление развития механистических моделей энергетического обмена связано с именем Р. Хью Мортонa (Massey University, Новая Зеландия) и его школы. Это направление заслуживает отдельного рассмотрения, поскольку в его основе лежит та же идея компартментного описания энергетического обмена, что и у Н.И. Волкова, но реализованная в иной математической форме.

Исходный гидравлический аналог Маргариа

Исходным пунктом этого направления послужила гидравлическая модель, предложенная Р. Маргариа [31]. В этой модели энергетические процессы при мышечной деятельности представлены как перетекание жидкости между тремя сообщающимися сосудами. Сосуд P символизирует фосфагенный (алактатный) источник, сосуд L - гликолитический (лактатный) источник, а сосуд O , обладающий бесконечной ёмкостью, - окислительный (аэробный) источник. Трубки между сосудами соответствуют скоростям перехода энергии из одного источника в другой, а кран T регулирует общий расход энергии (мощность выполняемой работы).

При открытии крана T уровень жидкости в сосуде P понижается, что вызывает приток из сосуда O через трубку R_1 . Этот приток и соответствует потреблению кислорода. Если мощность нагрузки не слишком велика, через некоторое время устанавливается равновесие, при котором весь энергетический запрос покрывается за счёт окислительных процессов. Если же уровень жидкости в сосуде P опускается ниже трубки R_1 , что происходит после использования примерно половины его содержимого, то включается поток через трубку R_2 , то есть начинается образование лактата. Этот момент соответствует переходу через анаэробный порог [32].

Эта модель принципиально сходна с построениями Н.И. Волкова. В обоих случаях энергетический обмен описывается как система взаимодействующих друг с другом резервуаров, а скорость перехода между ними задаётся константами. Различие состоит в том, что у Н.И. Волкова резервуары соответствуют метаболическим пространствам организма (работающие мышцы, кровь, сердце, печень, почки), тогда как у Р. Маргариа - биохимическим путям ресинтеза АТФ.



Математическое решение модели

Гидравлическая модель Р. Маргариа была сформулирована лишь качественно, без количественного решения. Именно эту задачу и решил Р. Мортон. В работе 1985 года он показал, что поведение модели описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами [32]:

$$\frac{d^2l}{dt^2} + \frac{M_L(A_P + A_L)}{A_P A_L} \frac{dl}{dt} + \frac{M_L(W - M_O)}{A_P A_L} = 0, \quad (15)$$

где l - понижение уровня жидкости в сосуде L ; A_P и A_L - площади поперечного сечения сосудов P и L ; M_L - максимальная скорость образования лактата; M_O - максимальная скорость потребления кислорода; W - мощность нагрузки.

Общее решение этого уравнения, как показал Р. Мортон, представляет собой биэкспоненциальную зависимость вида

$$l = \alpha - \beta e^{-k_1 t} + \gamma e^{-k_2 t}, \quad (16)$$

что структурно совпадает с решением, полученным Н.И. Волковым для концентрации субстрата окисления (уравнение 2 настоящей работы). Р. Мортон при построении своей модели опирался на работу Н.И. Волкова 1966 года, которую он цитирует как одну из немногих существовавших на тот момент теоретических моделей потребления кислорода, хотя и отмечает, что она не включала описания образования лактата и распада фосфагенов [32].

Эта связь не является частным наблюдением настоящей работы. В обзоре истории кибернетики в спорте, посвящённом моделям, созданным в СССР в 1960-е годы, модели Н.И. Волкова прямо охарактеризованы как прототип, на основе которого Р. Мортон впоследствии разработал свою трёхкомпонентную модель биоэнергетики мышечной деятельности человека; при этом отмечено, что сам Р. Мортон ссылается на работы Н.И. Волкова [33]. Преемственность между отечественной и зарубежной линиями развития биоэнергетических моделей зафиксирована в литературе независимо от настоящего исследования.

Р. Мортон не ограничился решением исходной модели, но и провёл её критический анализ. Сопоставление расчётных кривых с экспериментальными данными показало, что модель Маргариа приводит к ряду расхождений с реальностью. В частности, модель предсказывала, что анаэробный порог совпадает с уровнем максимального потребления кислорода, тогда как в действительности он располагается существенно ниже, составляя у тренированных бегунов около 65% от МПК, а у нетренированных и того меньше [32]. На основании этих расхождений Р. Мортон сделал вывод о необходимости пересмотра исходной модели.

Трёхкомпонентная модель Маргариа-Мортон

Развитие этого вывода привело к построению обобщённой трёхкомпонентной модели, получившей в литературе название модели Маргариа-Мортон (М-М model). Р. Мортон показал, что из шестнадцати возможных конфигураций гидравлической системы лишь четыре согласуются с известными физиологическими фактами, а впоследствии, в работе 1990 года, число допустимых конфигураций было сведено к единственной [34, 35].

В обобщённой модели верхний уровень сосуда L расположен ниже уровня жидкости в сосуде O , но выше трубки R_1 . Это означает, что образование лактата начинается



лишь после того, как потребление кислорода достигнет некоторого уровня, существенно превышающего уровень покоя, но заметно ниже максимального. Анаэробный порог перестаёт совпадать с МПК и определяется как точка перехода от моноэкспоненциальной кинетики потребления O_2 к биэкспоненциальной [27, 34]. Это положение впоследствии получило прямое экспериментальное подтверждение в исследованиях кинетики потребления кислорода [16].

Модель Маргариа-Мортон позволила получить ряд уравнений, описывающих динамику максимальной мощности и выносливости. Так, для максимальной мощности, которую способен развить спортсмен в режиме «до отказа», было получено уравнение [36]

$$W_m = \frac{2M_O M_P}{2M_O + M_P} \left[1 - \exp \left(-\frac{2M_O + M_P}{2A_P} t \right) \right], \quad (17)$$

где M_P - максимальный поток из сосуда P (мощность фосфагенного источника). Из этого уравнения следует, что максимальная мощность экспоненциально убывает со временем работы, стремясь к некоторому равновесному значению.

Четырёхкомпонентная гидравлическая модель

Дальнейшее развитие гидравлического направления привело к построению четырёхкомпонентной модели, в которой наряду с фосфагенным, гликолитическим и аэробным компонентами отдельно выделен резервуар субстратов окисления, различающий жиры и углеводы. Такая модель была предложена Д. Сундстрёмом и соавторами [37, 38]. Её схема представлена на рисунке 5.

Содержательное отличие этой модели состоит в том, что она описывает не только динамику ресинтеза АТФ, но и переключение между окислением жиров и углеводов в зависимости от текущего запаса углеводов и интенсивности работы. Регуляция окислительного выбора топлива и скорости анаэробного гликолиза ставится в зависимость от наличного депо углеводов, что позволяет воспроизводить экспериментально наблюдаемые сдвиги в субстратном обеспечении при длительной работе [37]. Математически модель формулируется как система дифференциальных уравнений и решается численно.

Эта конструкция также сохраняет преимущество по отношению к построениям Н.И. Волкова. Выделение отдельных резервуаров для субстратов окисления прямо перекликается с компартментным описанием, в котором динамика содержания субстрата окисления X_1 описывалась дифференциальным уравнением второго порядка. Различие состоит в степени детализации: у Н.И. Волкова субстрат окисления рассматривался как единая величина, тогда как четырёхкомпонентная модель разделяет жировое и углеводное депо и вводит регуляцию их использования.

Аналогичная линия развития прослеживается и в работах, где кинетика потребления O_2 описывается последовательностью моделей возрастающей сложности. В работе Й. Мокснеса и О. Сандбакка [39] предложена четырёхкомпонентная модель кинетики потребления кислорода, учитывающая запаздывающий медленный компонент, влияние лактатного энергообразования на аэробную кинетику и обобщённый кислородный дефицит. Наиболее развитый вариант модели дал наилучшее согласие с экспериментальными данными, в том числе при работе выше лактатного порога и в период восстановления [39]. Существенно, что эта модель приводит к соотношению, связывающему алактатную мощность со скоростью изменения аэробной мощности, что по смыслу близко к представлению Н.И. Волкова о последовательном включении источников энергообеспечения.

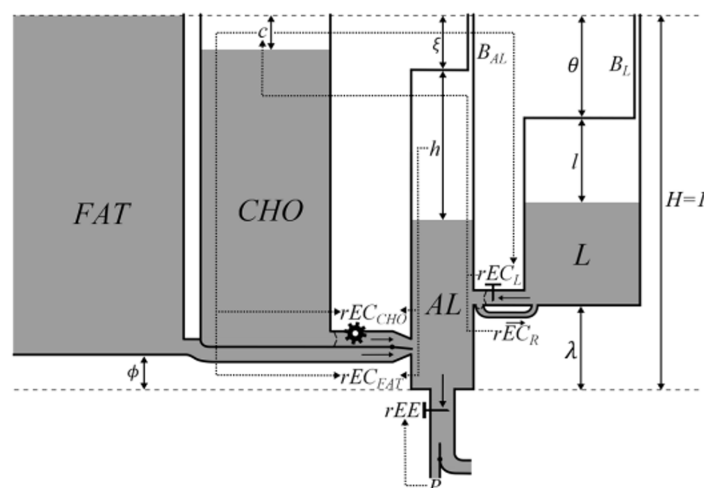


Рис. 5: Четырёхкомпонентная гидравлическая модель энергетического обмена [37]: резервуары жиров (FAT) и углеводов (CHO) разделены, алактатный резервуар (AL) и лактатный резервуар (L) связаны с ними через регулируемые потоки. Обозначены уровни c , ξ , h , l , θ , коэффициенты расхода rEC и итоговый выход мощности P

Fig. 5: Four-compartment hydraulic model of energy metabolism: the fat (FAT) and carbohydrate (CHO) reservoirs are separated; the alactic (AL) and lactate (L) reservoirs are connected to them through regulated flows. Levels c , ξ , h , l , θ , flow coefficients rEC and the resulting power output P are indicated

Критическая мощность как современный аналог критериев Н.И. Волкова

Особый интерес представляет вторая линия развития этого направления, связанная с концепцией критической мощности. В отличие от гидравлических моделей, описывающих внутренние потоки энергии, критическая мощность является феноменологической характеристикой, определяемой по зависимости предельного времени работы от её мощности.

Исходное соотношение концепции было установлено Ж. Моно и Дж. Шеррером ещё в 1965 году. Оно связывает выполняемую работу W с временем до отказа t линейной зависимостью [26]:

$$W = AWC + CP \cdot t, \quad (18)$$

где CP (критическая мощность) - угловой коэффициент, а AWC (анаэробная рабочая ёмкость) - отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат. Эквивалентная форма записи выражает предельное время работы как функцию мощности:

$$t = \frac{AWC}{P - CP}. \quad (19)$$

Перенос этой концепции на упражнения с участием больших мышечных групп был осуществлён в работе Т. Моритани и соавторов, а затем развит в работах Р. Мортон и других исследователей [26]. В целостном виде концепция опирается на четыре исходных положения: энергообеспечение имеет два компонента - аэробный и анаэробный; аэробный компонент не ограничен по ёмкости, но ограничен по скорости, и его предельная скорость



равна критической мощности; анаэробный компонент, напротив, не ограничен по скорости, но ограничен по ёмкости, равной AWC ; истощение анаэробной ёмкости означает наступление отказа [26, 40].

Сопоставление этих положений с системой критериев Н.И. Волкова обнаруживает прямое соответствие. Критическая мощность отвечает критерию мощности аэробного механизма, а анаэробная рабочая ёмкость - критерию ёмкости анаэробных механизмов. Различие состоит в способе выражения: у Н.И. Волкова обе характеристики выводились из кинетических констант метаболических процессов, тогда как в концепции критической мощности они определяются непосредственно из кривой «мощность-время».

Дальнейшее развитие концепции привело к появлению трёхпараметрической модели, в которой учтено, что предельное время работы при критической мощности не бесконечно, а конечно и определяется остаточным запасом анаэробной ёмкости [28]. Кроме того, была выявлена связь критической мощности с максимальным устойчивым уровнем лактата: было показано, что критическая мощность соответствует максимальной мощности, при которой концентрация лактата в крови стабилизируется на постоянном уровне [40]. Это положение непосредственно перекликается с представлением Н.И. Волкова о критической мощности как о нагрузке, при которой фиксируется максимум потребления кислорода.

Устойчивость концепции критической мощности к проверке на экспериментальных данных оказалась исключительно высокой. Многочисленные исследования подтвердили хорошее соответствие гиперболической зависимости «мощность-время» данным, полученным как в лабораторных, так и в естественных условиях [26, 41]. Именно это обстоятельство делает концепцию критической мощности удобным мостом между механистическими моделями, к числу которых относится модель Н.И. Волкова, и феноменологическими описаниями тренировочного процесса.

Современный этап развития концепции связан с исследованиями, в которых критическая мощность рассматривается как порог утомления, разделяющий зоны, внутри которых физиологические реакции могут и не могут стабилизироваться [18]. Было показано, что превышение критической мощности приводит к прогрессирующему расходованию конечной работы W' , накоплению метаболитов во внутримышечной среде и к неизбежному достижению максимального потребления кислорода [18, 30]. Тем самым современная трактовка критической мощности приобретает отчётливо механистический характер, сближаясь с исходной постановкой Н.И. Волкова.

Дальнейшее развитие этого направления привело к построению моделей восстановления W' в условиях интервальной работы, в которых учитывается, что конечная работа выше критической мощности восстанавливается по экспоненциальному закону во время пауз отдыха [42, 43]. Эти модели по своей структуре напоминают уравнения кинетики восстановления, полученные Н.И. Волковым: в обоих случаях восстановление работоспособности описывается как экспоненциальный процесс с характерной константой скорости. Такое совпадение не случайно, поскольку в основе обеих моделей лежит представление о расходовании и последующем восполнении ограниченного метаболического ресурса.

Связь с динамическими моделями тренировки

Школа Мортон не ограничилась построением биоэнергетических моделей, но и внесла вклад в развитие динамических моделей тренировки, начало которым положил Э. Банистер. В совместной работе Р. Мортон с Дж. Фитц-Кларком и Э. Банистером было предложено использовать так называемые кривые влияния (influence curves) для



оптимизации тренировочного процесса [44]. Этот результат важен в контексте настоящей работы, поскольку он показывает, что механистическое и динамическое направления не являются взаимоисключающими, а допускают объединение в рамках единой методологии.

Рассмотрение биоэнергетической модели Мортон и его последователей приводит к выводу: основная идея теории Н.И. Волкова - представление энергетического обмена как системы взаимодействующих компартментов с кинетическими константами - не только сохранила своё значение, но и определила магистральное направление развития количественных моделей биоэнергетики мышечной деятельности в мировой спортивной науке.

Типология связей между моделями

Изложенное выше заставляет поставить методический вопрос: по какому признаку те или иные современные модели правомерно относить к наследию Н.И. Волкова и в каких случаях упоминание той или иной модели в настоящей работе вообще оправдано. Без ответа на него перечень современных конструкций легко превращается в перечисление, не имеющее отношения к предмету статьи.

Целесообразно различать четыре типа связей (таблица 2).

К первой группе относятся модели, создатели которых прямо опирались на работы Н.И. Волкова. Такая связь документально подтверждена и не требует интерпретации: гидравлическая модель Р. Мортон построена с опорой на статью 1966 года, а в историографической литературе модели Н.И. Волкова названы прототипом его трёхкомпонентной модели [32, 33]. Упоминание этих моделей не просто оправдано, а необходимо, поскольку без него картина развития биоэнергетического моделирования была бы неполной. К той же группе относится и модель В. Н. Селуянова [25], развивающая критерии Н. И. Волкова применительно к структурам мышечного волокна; здесь связь носит характер прямого продолжения, а не цитирования, и потому выделена в таблице отдельной строкой.

Вторую группу образуют конструкции, совпадающие с построениями Н.И. Волкова по математической структуре независимо от того, имело ли место прямое заимствование. Биэкспоненциальная форма кривой потребления O_2 , разность двух экспонент в уравнении лактата, переход от моноэкспоненциальной к биэкспоненциальной кинетике при превышении порога - всё это воспроизводит структуру модели 1966 года [15, 16, 17]. Здесь связь устанавливается не по ссылке, а по совпадению формы уравнений и их физиологической интерпретации.

Третью группу составляют понятийные соответствия. Критическая мощность, конечная работа W' и максимальный устойчивый уровень лактата не выводятся из уравнений Н.И. Волкова, но выражают тот же самый содержательный смысл, что и его критерии мощности, ёмкости и эффективности [26, 18, 28]. Упоминание таких конструкций оправдано потому, что оно позволяет показать, в какой форме идеи Н.И. Волкова существуют в современной спортивной науке.

Четвёртую группу образуют аналогии, то есть совпадения, которые объясняются не преемственностью, а тем, что обе модели описывают один и тот же тип процесса. Модели восстановления W' при интервальной работе [42, 43] и уравнения кинетики восстановления Н.И. Волкова сходны потому, что в обоих случаях речь идёт о расходовании и последующем экспоненциальном восполнении ограниченного метаболического ресурса. Природа этого сходства структурная, а не историческая, и потому его следует оговаривать именно как аналогию, не приписывая прямой связи.



Таблица 2: Типология связей между моделью Н.И. Волкова и современными моделями
Table 2: Typology of relations between the Volkov model and modern models

Модель / Model	Тип связи / Type	Основание / Basis	Источник / Source
Гидравлическая модель Маргариа-Мортон	прямое цитирование	Р. Мортон ссылается на работу 1966 г.	[32, 33]
Биекспоненциальная кинетика $\dot{V}O_2$	структурное совпадение	та же форма уравнения	[15, 16]
Медленный компонент $\dot{V}O_2$	структурное совпадение	вторая экспонента как окислительное устранение лактата	[26, 17]
Кинетика лактата	структурное совпадение	разность двух экспонент	[8]
Критическая мощность (CP)	понятийное соответствие	критерий мощности аэробного механизма	[18, 28]
Работа W' (AWC)	понятийное соответствие	критерий ёмкости анаэробных механизмов	[26]
MLSS	понятийное соответствие	максимальная стабилизируемая концентрация лактата	[18]
Восстановление W'	аналогия	экспоненциальное восполнение ограниченного ресурса	[42, 43]
Кривые влияния	методологический мост	оптимизация тренировки по отклику	[44]
Четырёхкомпонентная модель	структурное совпадение	разделение субстратов окисления и регуляция их использования	[37, 39]
Модель структурной адаптации В. Н. Селуянова	прямое продолжение	критерии мощности, ёмкости и эффективности, отнесённые к структурам мышечного волокна	[25]
Модели Н.Н. Энгвера и Э. Банистера	общий объект, иной уровень	феноменологическое описание «нагрузка - результат»	[24, 23]

Модели Н.Н. Энгвера и Э. Банистера [24, 23] связаны с построениями Н.И. Волкова только общим объектом исследования: ни цитирования, ни структурного сходства между ними нет, а уровень описания различается принципиально. Они упоминаются в настоящей работе лишь постольку, поскольку составляют контекст первых двух частей серии и позволяют показать место механистического подхода среди феноменологического и динамического. Иное положение занимает модель В. Н. Селуянова [25]: она относится к той же научной школе и потому рассматривается как непосредственное продолжение линии Н.И. Волкова, а не как внешний контекст.

Из сказанного вытекает следующее правило: модель упоминается только тогда, когда может быть явно указан тип её связи с построениями Н.И. Волкова, а если связь



носит характер аналогии либо ограничивается общностью объекта, это оговаривается отдельно. По этой причине в статье не рассматриваются, например, модели прогноза спортивного результата, основанные на методах машинного обучения: их отношение к наследию Н.И. Волкова исчерпывается общностью объекта и потому не даёт основания для содержательного сопоставления.

Выводы

Н.И. Волков создал целостную математическую теорию адаптации энергетического обмена к физическим нагрузкам, которая включает следующие компоненты:

- 1) компартментную кинетическую модель энергетического обмена, в которой динамика содержания субстрата окисления описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами;
- 2) биэкспоненциальные уравнения кинетики потребления O_2 во время работы и в период восстановления, а также уравнение динамики содержания лактата в крови, содержащее разность двух экспонент;
- 3) систему критериев мощности, ёмкости и эффективности механизмов энергообеспечения, позволяющую количественно охарактеризовать алактатный, гликолитический и аэробный процессы;
- 4) математический аппарат оптимизации тренировочного процесса, включающий построение целевых функций, определение зоны оптимальных нагрузок на основе параболической зависимости и планирование экстремального эксперимента [21].

Программная статья Н.И. Волкова 1997 года [1] показывает, что сам автор рассматривал разработку математических моделей адаптации и автоматизированных систем управления физическим состоянием спортсменов как одну из центральных задач спортивной науки на рубеже веков. Тем самым настоящая серия работ, включающая рассмотренные ранее феноменологические модели и настоящую механистическую, реализует программу, намеченную её героем.

Установленная Н.И. Волковым закономерность последовательного развития мощности, ёмкости и эффективности биоэнергетических механизмов сохраняет значение как принцип планирования многолетней тренировки.

Сопоставление теории Н.И. Волкова с современными представлениями показывает, что её основные положения не утратили значения. Биэкспоненциальная форма уравнений кинетики потребления O_2 и лактата, разграничение мощности и ёмкости механизмов энергообеспечения, представление о критической нагрузке, разделяющей аэробную и анаэробную зоны, - все эти элементы вошли в современную спортивную науку и получили дальнейшее развитие в концепции критической мощности и в гидравлических моделях биоэнергетики мышечной деятельности.

Заключение

Теоретическая значимость рассмотренного наследия состоит в том, что подход Н.И. Волкова завершает ряд из четырёх математических моделей спортивной тренировки, рассмотренных в настоящей серии работ. Если Н.Н. Энгвер [23] показал, что тренировочный процесс допускает описание статистическое, Э. Банистер [24] - что он допускает



описание динамическое, а В. Н. Селуянов [25] - что он допускает описание структурно-морфологическое, на уровне перестройки мышечного волокна, то Н.И. Волков показал, что он допускает описание механистическое, исходящее из кинетики метаболических процессов.

Историческое первенство в построении количественной теории энергетического обмена принадлежит именно Н.И. Волкову. Его работа 1966 года предшествовала не только классической модели Э. Банистера, но и гидравлической модели Р. Маргариа, математическое решение которой было получено лишь в 1985 году. При этом Р. Мортон, развивая свою модель, прямо ссылаясь на работу Н.И. Волкова как на один из немногих существовавших теоретических подходов к описанию потребления кислорода.

Практическая значимость определяется тем, что предложенные уравнения и критерии могут быть непосредственно использованы при построении систем управления тренировочным процессом. Значения констант k_1 , k_2 , λ_1 и λ_2 , определённые для конкретного спортсмена, позволяют индивидуализировать не только объём и интенсивность нагрузки, но и продолжительность интервалов отдыха, а также прогнозировать сроки выхода на новый уровень работоспособности.

В перспективе представляется целесообразным объединение кинетической модели Н.И. Волкова с современными средствами непрерывного мониторинга функционального состояния. Такое объединение позволило бы перейти от периодических лабораторных обследований к непрерывному сопровождению тренировочного процесса, при котором параметры модели уточняются по мере накопления данных.

Особого внимания заслуживает роль моделей, формул, схем и графиков, последовательно рассмотренных во всех трёх частях настоящего цикла. Уравнение спортивного результата Н. Н. Энгвера описывает динамику подготовленности на масштабе месяцев и лет, модель В. Н. Селуянова - перестройку функциональных систем на масштабе недель, а уравнения и критерии Н. И. Волкова - энергообеспечение отдельного упражнения и ближайшего восстановления на масштабе секунд и минут. Вместе они образуют единую шкалу временных масштабов адаптации - от одного движения до многолетней подготовки - и позволяют тренеру видеть, какое именно звено определяет результат в каждом конкретном случае. Ни одна система искусственного интеллекта такого понимания не даёт: она выявляет статистические зависимости в данных, но не раскрывает механизм явления и не отвечает на вопрос, почему результат таков. Именно поэтому неизбежные упрощения моделей не снижают, а повышают их ценность: отбрасывая второстепенное, формула или схема позволяет выхватить суть процесса, а потому служит не только инструментом расчёта, но и средством профессионального образования тренеров и специалистов в области спорта.

Список литературы / References

1. Волков Н.И. Биология спорта на пороге XXI века // Юбилейный сборник трудов ученых РГАФК, посвященный 80-летию академии. Москва : РГАФК, 1997. Т. 1. С. 55-60. URL: <http://lib.sportedu.ru/GetText.idc?TxtID=769>

Volkov N.I. Biology of sport on the threshold of the 21st century. In: *Anniversary Collection of Works of Scientists of the Russian State Academy of Physical Culture Dedicated to the 80th Anniversary of the Academy*, Moscow, RGAFFK, 1997, vol. 1, pp. 55-60. (in Russ.)

2. Тимме Е.А. На пути к математической теории спортивной тренировки. Часть 1. Математическая модель тренировочного процесса и уравнение спортивного результата Николая Николаевича



Энгвера // Российский журнал информационных технологий в спорте. 2025. Т. 2, № 2. С. 24-41. EDN QKHJKJ

Timme E.A. Towards a mathematical theory of athletic training. Part 1. The mathematical model of the training process and the equation of athletic performance by Nikolai Nikolaevich Engwer. *Russian Journal of Information Technology in Sports*, 2025, 2(2), pp. 24-41. (in Russ.) <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2025-2-2-24-41>

3. Тимме Е.А. На пути к математической теории спортивной тренировки. Часть 2. Математическое моделирование процессов адаптации при воздействии тренировочных нагрузок: подход Виктора Николаевича Селуянова // Российский журнал информационных технологий в спорте. 2025. Т. 2, № 4. С. 55-79. EDN MBIEEX

Timme E.A. Towards a mathematical theory of athletic training. Part 2. Mathematical modeling of adaptation processes under the influence of training loads: the approach of Viktor Nikolaevich Seluyanov. *Russian Journal of Information Technology in Sports*, 2025, 2(4), pp. 55-79. (in Russ.) <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2025-2-4-55-79>

4. Волков Н.И. Энергетический обмен и работоспособность человека в условиях напряжённой мышечной деятельности : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.00. Москва, 1967. 717 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010193347>

Volkov N.I. Energy Metabolism and Human Working Capacity under Conditions of Strenuous Muscular Activity: Cand. Sci. (Biology) Dissertation: 03.00.00. Moscow, 1967, 717 p. (in Russ.)

5. Волков Н.И. Биоэнергетика напряжённой мышечной деятельности человека и способы повышения работоспособности спортсменов : дис. ... д-ра биол. наук : 14.00.17 : в форме науч. доклада. АМН СССР, НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина. Москва, 1990. 152 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000005628/

Volkov N.I. Bioenergetics of Strenuous Muscular Activity of Man and Ways to Improve the Working Capacity of Athletes: Dr. Sci. (Biology) Dissertation: in the form of a scientific report. Academy of Medical Sciences of the USSR, Institute of Normal Physiology named after P.K. Anokhin. Moscow, 1990, 152 p. (in Russ.)

6. Волков Н.И., Олейников В.И. Биоэнергетика спорта : монография. Москва : Советский спорт, 2011. 160 с. ISBN 978-5-9718-0525-0. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_-bibl_1822425/

Volkov N.I., Oleynikov V.I. Sport Bioenergetics: A Monograph. Moscow: Sovetsky Sport, 2011, 160 p. (in Russ.) ISBN 978-5-9718-0525-0.

7. Волков Н.И. Математическое моделирование процессов энергетического обмена у человека при мышечной деятельности // Кибернетика и спорт : труды научной конференции. Москва, 1965. С. 12-13. URL: <http://lib.sportedu.ru/BiblCard.idc?DocID=365119>

Volkov N.I. Mathematical modeling of human energy metabolism in muscle activity. In: *Cybernetics and Sport: Proceedings of the Scientific Conference*. Moscow, 1965, pp. 12-13. (in Russ.)

8. Волков Н.И. Математическое моделирование процессов энергетического обмена у человека при мышечной деятельности // Теория и практика физической культуры. 1966. № 5. С. 37-43. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_015456803/

Volkov N.I. The creation of a mathematical model of the processes of energy metabolism during muscular activity. *Theory and Practice of Physical Culture*, 1966, (5), pp. 37-43. (in Russ.)

9. Волков Н.И., Савелев И.А. Кислородный запрос и энергетическая стоимость напряжённой мышечной деятельности человека // Физиология человека. 2002. Т. 28, № 4. С. 80-84.



Volkov N.I., Savelev I.A. Oxygen demand and energy cost of strenuous muscular activity in man. *Human Physiology*, 2002, 28 (4), pp. 80-84. <https://doi.org/10.1023/A:1016538100568>

10. Volkov N.I. Intermittent hypoxic training to enhance endurance in elite swimmers. In: *Intermittent Hypoxia and Human Diseases*. London: Springer, 2012, pp. 183-191. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2906-6_15

11. Бреслав И.С., Волков Н.И., Тамбовцева Р.В. Дыхание и мышечная активность человека в спорте. Москва : Советский спорт, 2013. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006586466/

Breslav I.S., Volkov N.I., Tambovtseva R.V. Respiration and Muscular Activity of Man in Sport. Moscow: Sovetsky Sport, 2013. (in Russ.)

12. Волков Н.И. Проблемы и перспективы биоэнергетики спорта // Теория и практика физической культуры. 2009. № 1. С. 77-83. EDN JWICZD

Volkov N.I. Problems and prospects of sport bioenergetics. *Theory and Practice of Physical Culture*, 2009, (1), pp. 77-83. (in Russ.)

13. Волков Н.И., Попов О.И. Эргометрический анализ в спорте: проблемы и перспективы // Наука в Олимпийском спорте. 2001. № 1. С. 64-71. URL: https://ebooks.znu.edu.ua/index.php?action=url/view&url_id=49

Volkov N.I., Popov O.I. Ergometric analysis in sport: problems and prospects. *Science in Olympic Sport*, 2001, (1), pp. 64-71. (in Russ.)

14. Sheppard C.W., Householder A.S. The mathematical basis of the interpretation of tracer experiments in closed steady-state systems. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22, pp. 510-520. <https://doi.org/10.1063/1.1699992>

15. Poole D.C., Jones A.M. Oxygen uptake kinetics. *Comprehensive Physiology*, 2012, 2 (2), pp. 933-996. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100072>

16. Barstow T.J., Mole P.A. Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology*, 1991, 71 (6), pp. 2099-2106. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.71.6.2099>

17. Jones A.M., Grassi B., Christensen P.M., Krstrup P., Bangsbo J., Poole D.C. Slow component of VO₂ kinetics: mechanistic bases and practical applications. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2011, 43 (11), pp. 2046-2062. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31821fcfc1>

18. Poole D.C., Burnley M., Vanhatalo A., Rossiter H.B., Jones A.M. Critical power: an important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2016, 48 (11), pp. 2320-2334. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000939>

19. Булгакова Н.Ж., Волков Н.И., Попов О.И., Самборский А.Г. Нормирование тренировочных нагрузок с использованием показателей энергетической стоимости упражнения // Теория и практика физической культуры. 2003. № 5. С. 23-26. URL: <http://lib.sportedu.ru/press/tpfk/2003N5/>

Bulgakova N.Zh., Volkov N.I., Popov O.I., Samborsky A.G. Standardization of training loads using indicators of the energy cost of exercise. *Theory and Practice of Physical Culture*, 2003, (5), pp. 23-26. (in Russ.)

20. Энгвер Н.Н., Савицкий Я.И., Гибадуллин М.Г. Построение эмпирических формул и моделей в спорте // Теория и практика физической культуры. 1986. № 10. С. 35-37. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_015456899/

Engwer N.N., Savitskiy Ya.I., Gibadullin M.G. Construction of empirical formulas and models in sports. *Theory and Practice of Physical Culture*, 1986, (10), pp. 35-37. (in Russ.)



21. Волков Н.И., Зациорский В.М., Разумовский Е.А., Черемисинов В.Н. Применение математической теории планирования экспериментов для поиска оптимальной методики тренировки // Теория и практика физической культуры. 1968. № 11. С. 26-31. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_015456809/

Volkov N.I., Zatsiorsky V.M., Razumovsky E.A., Cheremisinov V.N. Application of the mathematical theory of experiment planning to the search for an optimal training methodology. *Theory and Practice of Physical Culture*, 1968, (11), pp. 26-31. (in Russ.)

22. Волков Н.И., Карасев А.В., Хосни М. Теория и практика интервальной тренировки в спорте. Москва : Военная академия им. Ф.Э. Дзержинского, 1995. URL: <http://lib.sportedu.ru/BiblCard.idc?DocID=79705>

Volkov N.I., Karasev A.V., Khosni M. Theory and Practice of Interval Training in Sport. Moscow: Military Academy named after F.E. Dzerzhinsky, 1995. (in Russ.)

23. Энгвер Н.Н. Уравнение спортивного результата // Подготовка предупреждающей информации (методические рекомендации). Рига, 1970. С. 73-76. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007328272/

Engwer N.N. The equation of sports results. In: *Preparation of Warning Information (Methodological Recommendations)*. Riga, 1970, pp. 73-76. (in Russ.)

24. Banister E.W., Calvert T.W., Savage M.V., Bach T.M. A systems model of training for athletic performance. *Australian Journal of Sports Medicine*, 1975, 7 (3), pp. 57-61.

25. Селуянов В.Н., Савельев И.А. Мощность, эффективность и ёмкость механизмов энергообеспечения как критерии оценки подготовленности спортсменов. URL: <https://prosportlab.com/works/adaptology/work-37>

Seluyanov V.N., Savelev I.A. Power, efficiency and capacity of energy supply mechanisms as criteria for assessing athletes' preparedness. URL: <https://prosportlab.com/works/adaptology/work-37> (in Russ.)

26. Morton R.H. The critical power and related whole-body bioenergetic models. *European Journal of Applied Physiology*, 2006, 96 (4), pp. 339-354. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-0088-2>

27. Morton R.H., Gass G.C. A systems model approach to the ventilatory anaerobic threshold. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1987, 56 (4), pp. 442-448. <https://doi.org/10.1007/BF00690907>

28. Morton R.H. A 3-parameter critical power model. *Ergonomics*, 1996, 39 (4), pp. 611-619. <https://doi.org/10.1080/00140139608964484>

29. Burnley M., Jones A.M. Power-duration relationship: physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*, 2018, 18 (1), pp. 1-12. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249524>

30. Jones A.M., Vanhatalo A. The "Critical Power" concept: applications to sports performance with a focus on intermittent high-intensity exercise. *Sports Medicine*, 2017, 47 (Suppl. 1), pp. 65-78. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0688-0>

31. Margaria R. Biomechanics and energetics of muscular exercise. Oxford: Oxford University Press, 1976. ISBN 978-0-19-857397-5. URL: <https://archive.org/details/biomechanicsener0000marg>

32. Morton R.H. On a model of human bioenergetics. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1985, 54 (3), pp. 285-290. <https://doi.org/10.1007/BF00426146>

33. Timme E.A., Dayal A.A., Kukushkin Y.A. History of cybernetics in sports in the USSR. In:



Proceedings of the 12th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2019), Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 61-68. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35048-2_8

34. Morton R.H. A three component model of human bioenergetics. *Journal of Mathematical Biology*, 1986, 24 (4), pp. 451-466. <https://doi.org/10.1007/BF01236892>

35. Morton R.H. Modelling human power and endurance. *Journal of Mathematical Biology*, 1990, 28 (1), pp. 49-64. <https://doi.org/10.1007/BF00171518>

36. Morton R.H. On a model of human bioenergetics II. Maximal power and endurance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1986, 55 (4), pp. 413-418. <https://doi.org/10.1007/BF00422743>

37. Sundström D., Bäckström M., Carlsson P., Tinnsten M. A four compartment model on human exercise bioenergetics. *Procedia Engineering*, 2015, 112, pp. 4-9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.166>

38. Sundström D. On a bioenergetic four-compartment model for human exercise. *Sports Engineering*, 2016, 19 (4), pp. 251-263. <https://doi.org/10.1007/s12283-016-0205-y>

39. Moxnes J.F., Sandbakk Ø. Mathematical modelling of the oxygen uptake kinetics during whole-body endurance exercise and recovery. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2017, 23 (1), pp. 76-86. <https://doi.org/10.1080/13873954.2017.1348364>

40. Jones A.M., Vanhatalo A., Burnley M., Morton R.H., Poole D.C. Critical power: implications for determination of VO₂max and exercise tolerance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2010, 42 (10), pp. 1876-1890. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d9cf7f>

41. Morton R.H., Hodgson D.J. The relationship between power output and endurance: a brief review. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1996, 73 (6), pp. 491-502. <https://doi.org/10.1007/BF00357670>

42. Skiba P.F., Chidnok W., Vanhatalo A., Jones A.M. Modeling the expenditure and reconstitution of work capacity above critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2012, 44 (8), pp. 1526-1532. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182517a80>

43. Skiba P.F., Jackman S., Clarke D., Vanhatalo A., Jones A.M. Effect of work and recovery durations on W' reconstitution during intermittent exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2014, 46 (7), pp. 1433-1440. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000226>

44. Fitz-Clarke J.R., Morton R.H., Banister E.W. Optimizing athletic performance by influence curves. *Journal of Applied Physiology*, 1991, 71 (3), pp. 1151-1158. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.71.3.1151>

Информация об авторе / Information about the author

Тимме Егор Анатольевич – кандидат технических наук, Ассоциация компьютерных наук в спорте (г. Москва, Российская Федерация) / Egor Timme – Cand. Sci. (Engineering), Russian Association of Computer Science in Sport (RACSS) (Moscow, Russian Federation); alpdem@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3998-7442.

Цитирование / Citation

Тимме Е.А. На пути к математической теории спортивной тренировки. Часть 3. Теория адаптации энергетического обмена к физическим нагрузкам Николая Ивановича



Волкова // Российский журнал информационных технологий в спорте. 2026. Т. 3, № 4. e202616. <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-4-e202616> EDN ASYPOU

Timme E.A. Towards a mathematical theory of athletic training. Part 3. The theory of adaptation of energy metabolism to physical loads by Nikolai Ivanovich Volkov. *Russian Journal of Information Technology in Sports*, 2026, 4(3), e202616. (in Russ.) <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-4-e202616> EDN ASYPOU

Получено/Received: 20.08.2026

Одобрено/Accepted: 22.09.2026

Опубликовано/Published: 30.09.2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 International
This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International

