



Нагрузочное тестирование с газовым анализом выдыхаемого воздуха (эргоспирометрия)

ЦЕЛИ ПРЕЗЕНТАЦИИ

- Терминология
- Патофизиология
- Проведение теста
- Представление данных
- Показатели исследования
- ХСН
- Реабилитация

CARDIO-PULMONARY EXERCISE TEST (CPX)

- Ergospirometry
- Spiroergometry
- Сердечно-легочный нагрузочный тест (СЛТ)
- Эргоспирометрия
- Спироэргометрия
- Нагрузочная проба с газовым анализом выдыхаемого воздуха

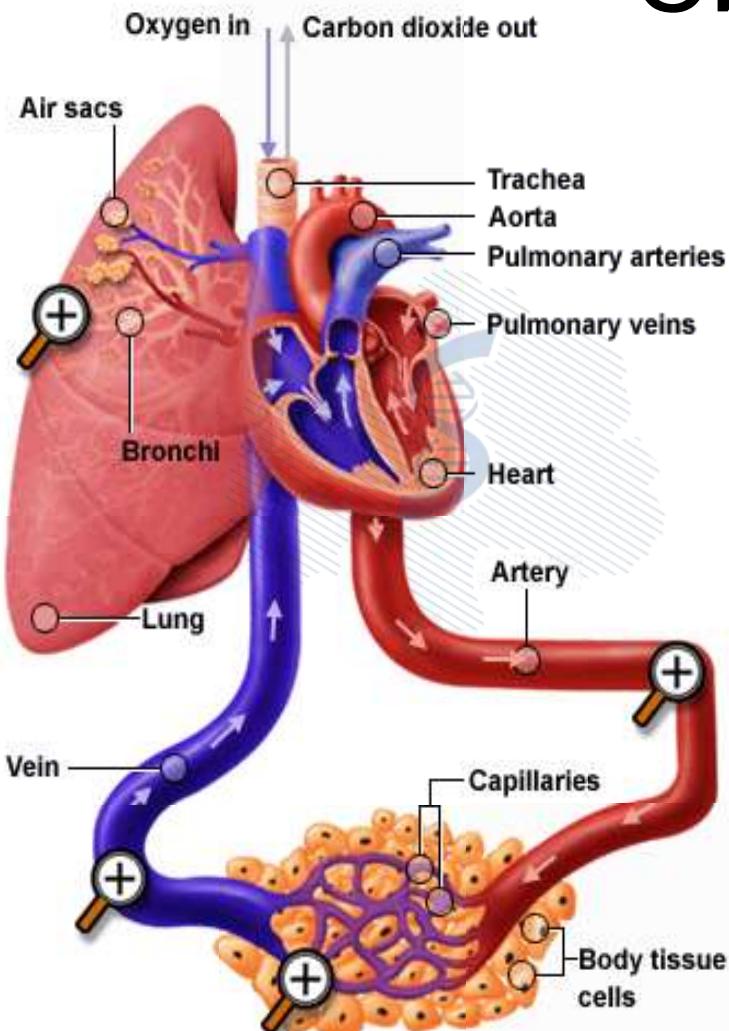
ЗАЧЕМ НУЖЕН СЛТ?



«Вы никогда не купите подержанный автомобиль, не проехав на нем и не убедившись, как работает двигатель на ходу. То же самое касается и оценки функции сердца»

Роберт А. Брюс, Медицинская школа Вашингтонского Университета, 1940-й год

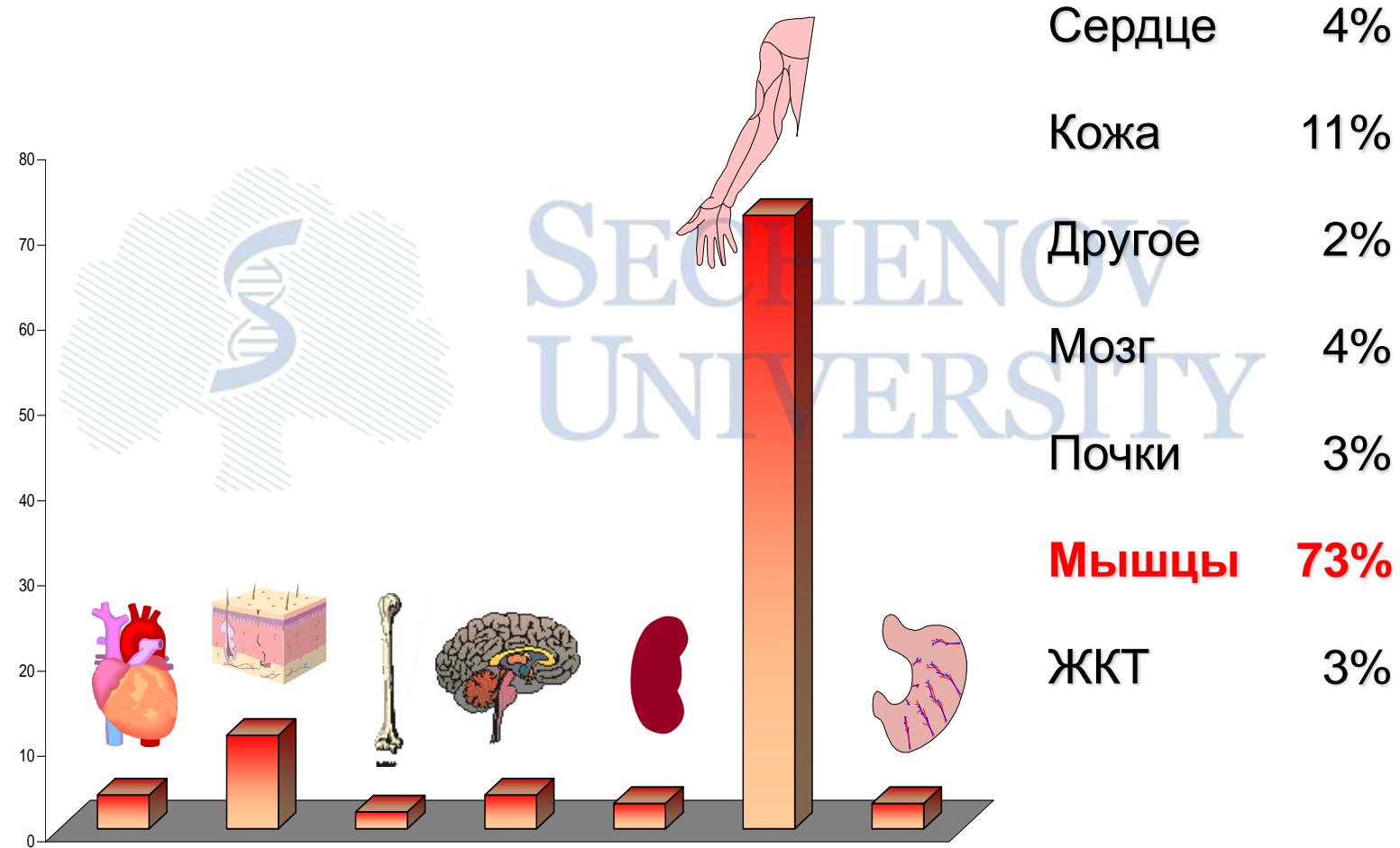
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТАЯ СИСТЕМА



SECH
UNIV



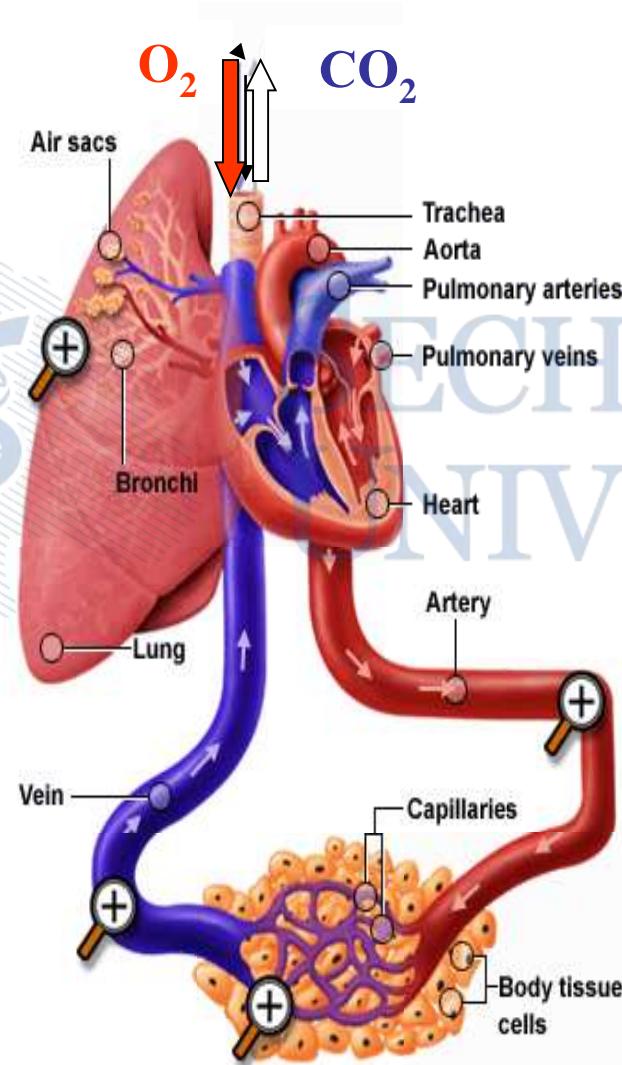
РАСХОД ПОТРЕБЛЯЕМОГО О₂ ВО ВРЕМЯ НАГРУЗКИ



ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПОТРЕБНОСТЕЙ ПРИ НАГРУЗКЕ

Легочная
вентиляция
(VE)

↑ в 8 – 10 раз



Сердечный выброс

4 – 6 л/мин

до 20 л/мин

Транспорт O₂ (Hb)

Экстракция O₂

25% → > 70%

ЭРГОСПИРОМЕТРИЯ

Одномоментная оценка функционального состояния сердечно-сосудистой системы, дыхательной системы и клеточного метаболизма:

- Степень нарушений
- Место нарушений (сердечно-сосудистая система, кровь, легкие, мышцы)
- Прогноз

ПОКАЗАНИЯ К ЭРГОСПИРОМЕТРИИ

**Хроническая
сердечная
недостаточность**

Диагноз
Тяжесть
Прогноз, отбор на
трансплантацию (I A)
Эффект лечения

Реабилитация

**Экспертиза
трудоспособности**

**Дифференциальный диагноз при
одышке/ утомляемости**

**Хирургия
Кардиохирургия**
Показания к операции
Оценка эффективности
Стратификация риска

**Изучение патогенеза,
механизмов лечебных
воздействий**

**Профессиональный и любительский
спорт, спортивная медицина**

СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНЫЙ ТЕСТ – ПЕРВЫЕ ШАГИ



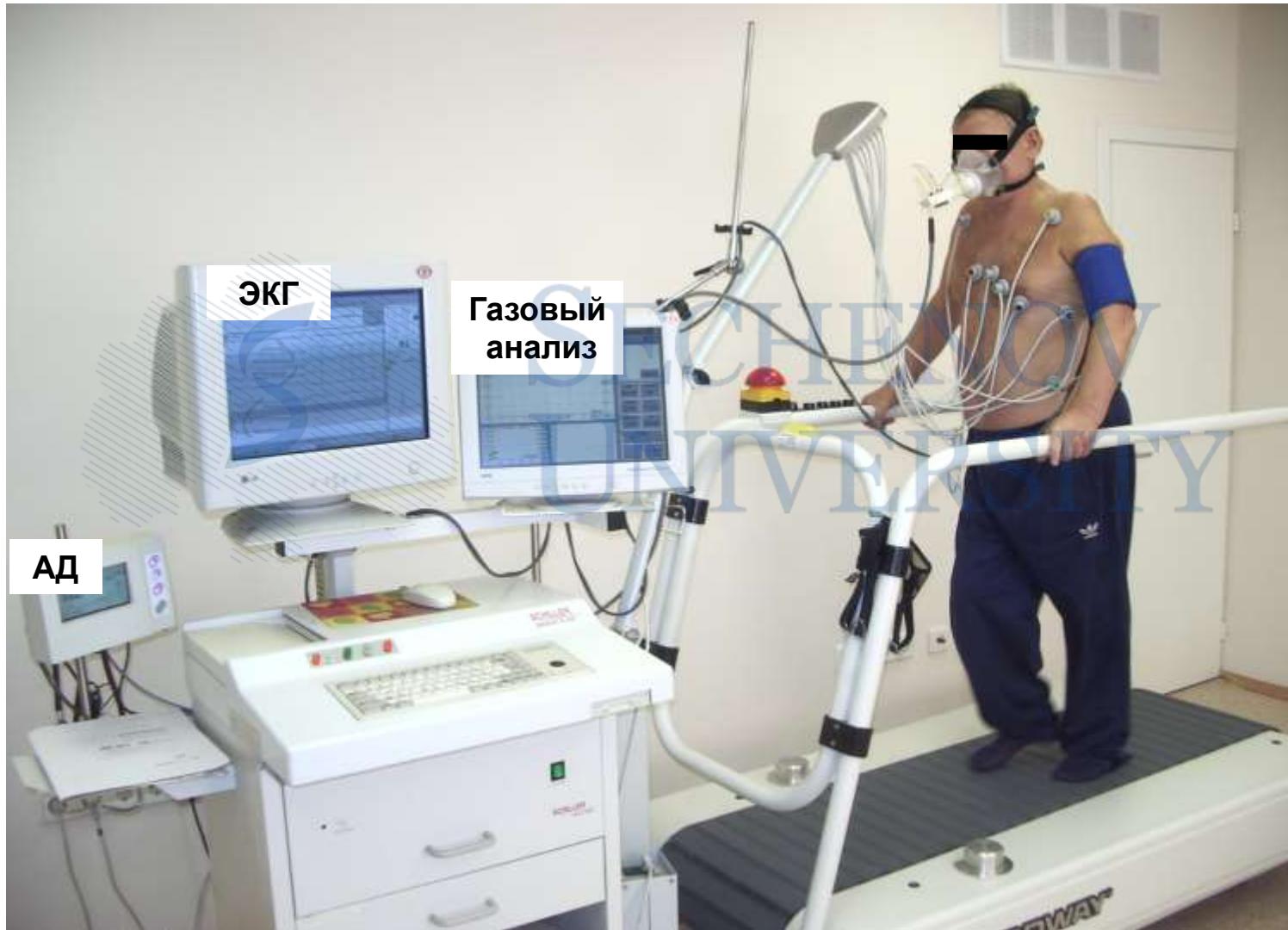
Spirographensystem 210D from the company Dargatz, 1954 in Köln

Source: Gas exchange according to Atwater and Benedict 1900 in USA

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СЛТ



ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СЛТ



ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТА

Тредмил

- BRUCE
- Modified BRUCE
- Naughton

Велоэргометр

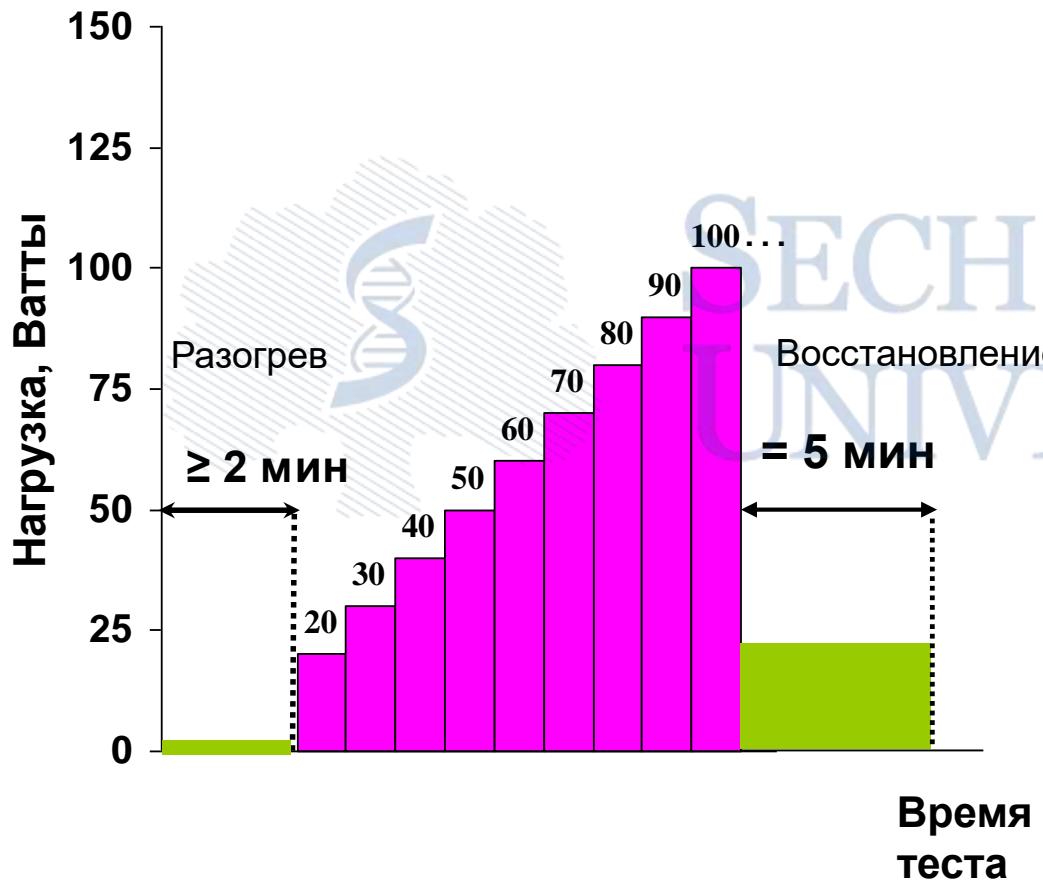
- 25 Вт + 25 Вт
- (каждые 2-3 минуты)
- 50 Вт + 50 Вт
- (каждые 2-3 минуты)



УСЛОВИЯ ПРАВИЛЬНОГО ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТА

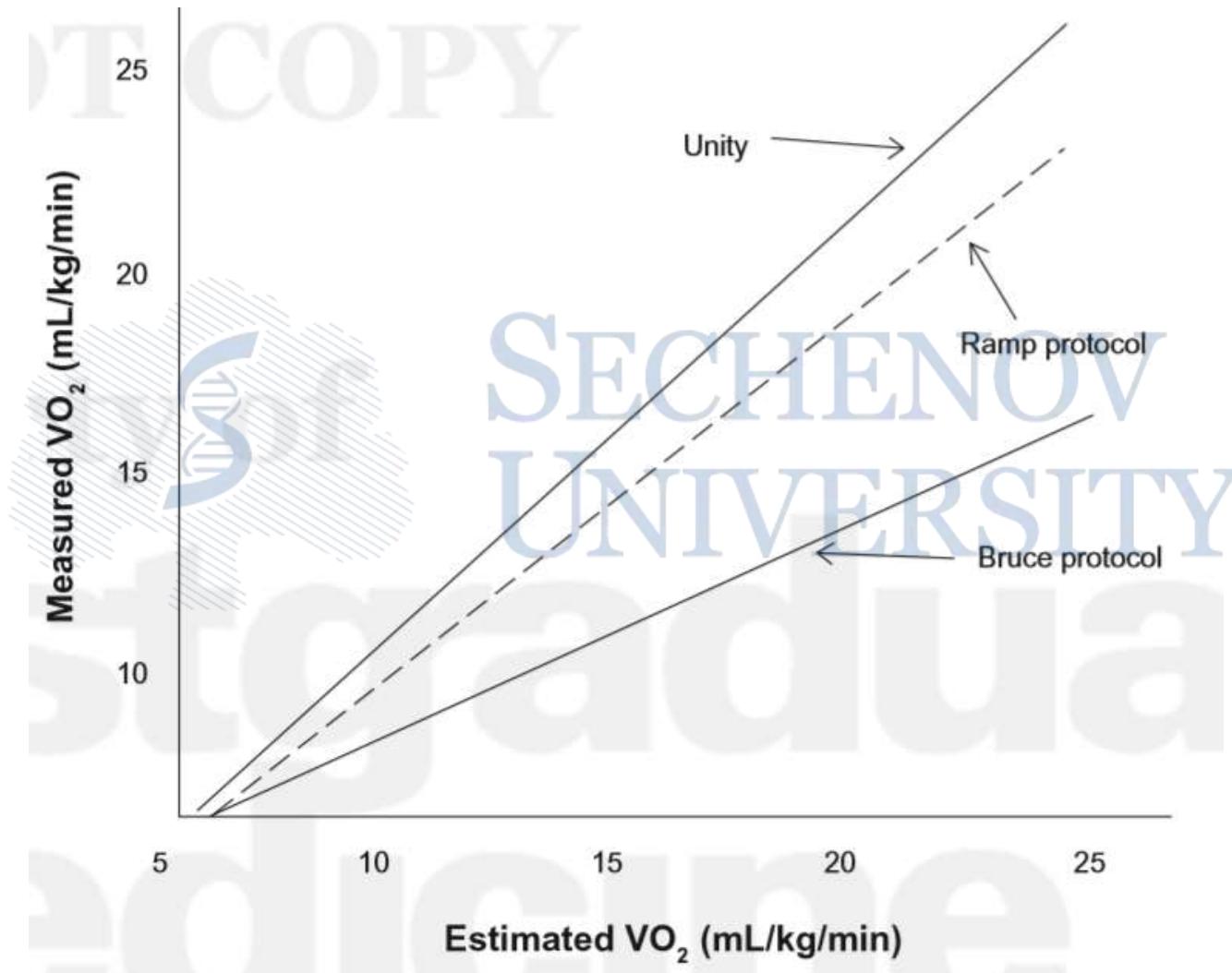
- Требуется адекватная (обычно ежедневная) калибровка оборудования.
- Учет температуры, влажности помещения.
- Кондиционирование помещения.
- Правильный размер маски и плотное прилегание.

RAMP-TEST (Рамп-тест)



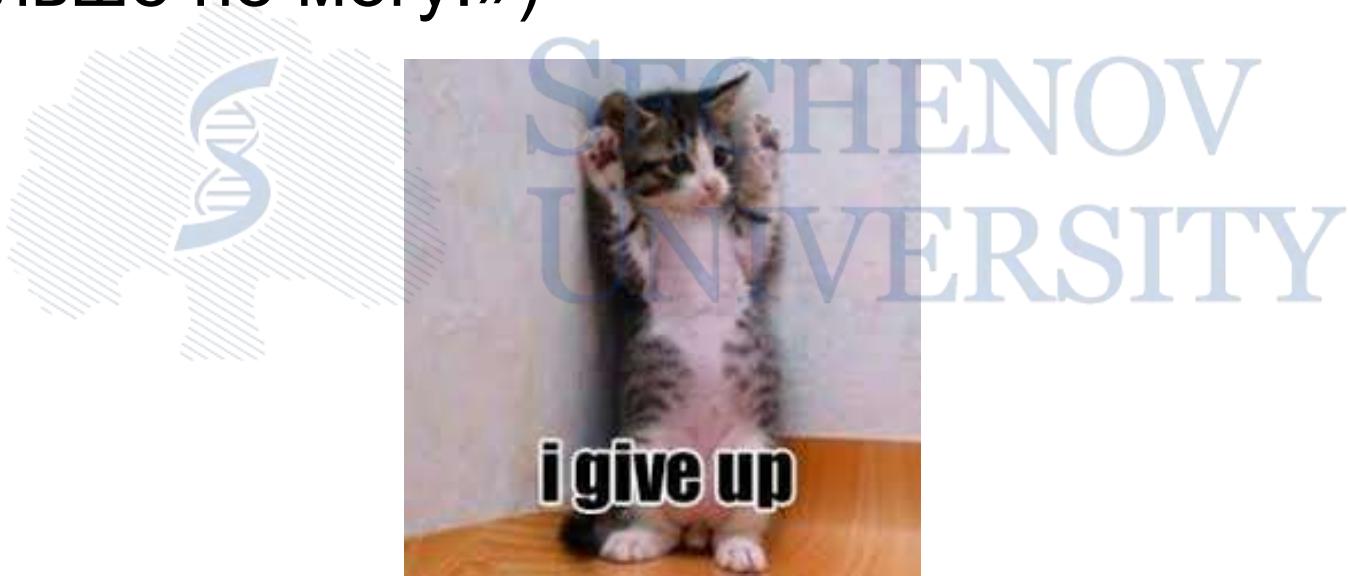
Рамп* – от англ. ramp – наклон, трап, перила

Правильный выбор протокола повышает точность расчёта



ОСТАНОВКА ТЕСТА

- Критерий выполнения теста – лимитирующие симптомы одышка и/или усталость, требующие прекращения нагрузки («я больше не могу!»)



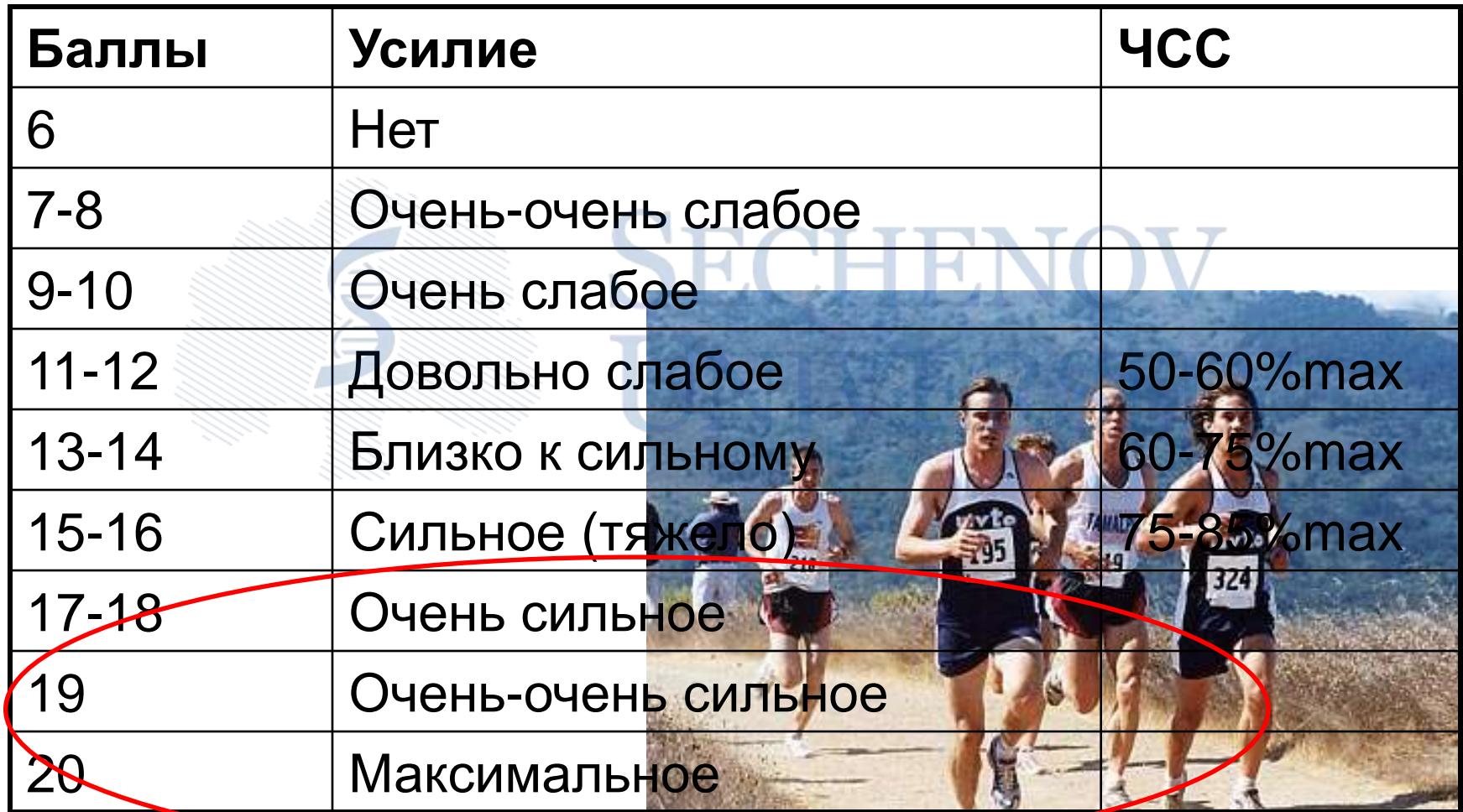
- Критерии досрочного прекращения теста и противопоказания стандартные

КАК ОПРЕДЕЛЕЙТЬ, ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ УСИЛИЕ БЫЛО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМ?



ШКАЛА БОРГА

Баллы	Усилие	ЧСС
6	Нет	
7-8	Очень-очень слабое	
9-10	Очень слабое	
11-12	Довольно слабое	50-60%max
13-14	Близко к сильному	60-75%max
15-16	Сильное (тяжело)	75-85%max
17-18	Очень сильное	
19	Очень-очень сильное	
20	Максимальное	

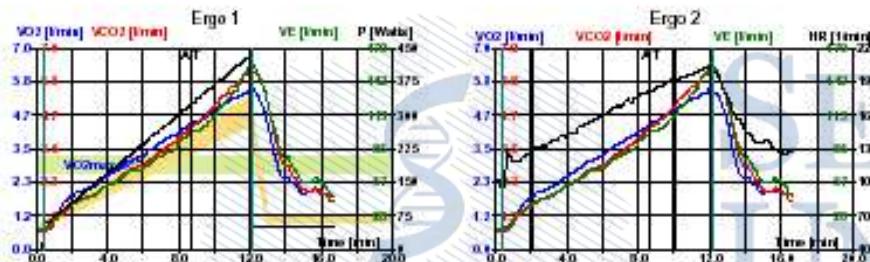


Представление результатов теста

- 2 -



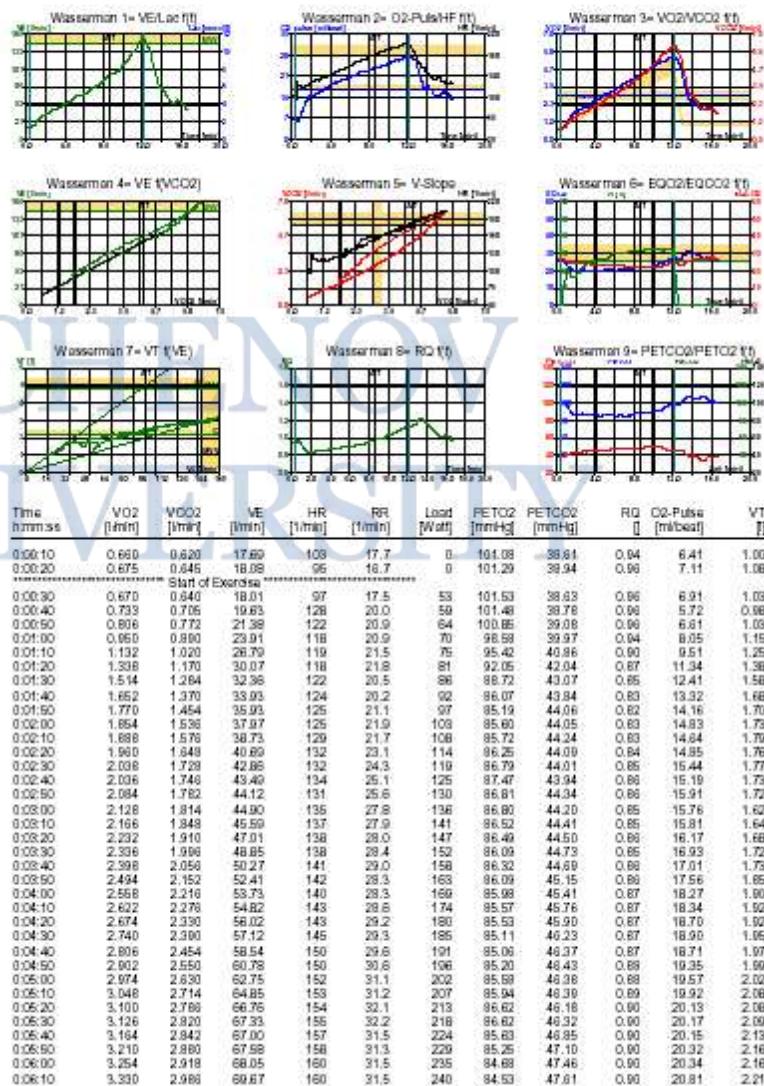
Last name: SCHREIBER 19 Years Hb value:
 First name: FABIAN 184 cm Indication:
 Date of birth: 25.01.1984 68 kg Nurse:
 IDNR: 200310231111300 male Physician:
 30.04.2003 / 14:50 Temperature 25.7°C Plumb. abs. rel.: 981/981 hPa Rel. humid.: 50% trel. 25.04.2004 / 10:37
 Pred. val: Wasserman, Jones
 Gansham PowerCube LFR 4F Relaxed 9



	Pred.	Max. value	Max./pred.	Rest	AT	Max. load	Recovery
Time, h:mm:ss	-	0:16:40	-	0:00:10	0:08:40	0:12:00	0:14:00
Load, Watt	264	432	163%	-	323	432	50
VE, l/min	95.65	158.46	166%	17.69	99.14	157.16	76.82
VO2, l/min	2.943	5.602	190%	0.660	4.370	5.602	2.462
VCO2, l/min	3.237	6.312	195%	0.620	4.264	6.312	2.864
RQ, -	-	1.22	-	0.94	0.98	1.13	1.16
VE/kg, ml/kg/min	1406.60	2330.24	166%	260.15	1457.94	2311.24	1129.76
VO2/kg, ml/kg/min	43.28	82.38	190%	9.71	64.26	82.38	36.21
VCO2/kg, ml/kg/min	47.61	92.82	195%	9.12	62.71	92.82	42.12
HR, 1/min	180	203	113%	103	182	202	145
O2-Pulse, ml/beat	16.35	27.73	170%	6.41	24.01	27.73	16.98
PETCO2, mmHg	-	107.61	-	101.08	88.14	97.84	106.11
PETCO2, mmHg	-	49.63	-	38.61	48.07	45.47	38.92
VD, l	-	-	-	-	-	-	-
VD/VT, -	-	-	-	-	-	-	-
Lac, mmol/l	-	-	-	-	-	-	-
ECO2, -	-	31.18	-	25.46	22.24	27.61	30.42
ECO2, -	-	27.42	-	27.10	22.79	24.50	26.15
BR, %	-	-	-	87.80	31.61	8.41	47.01
VE/VCO2 slope = 21.94	-	-	-	-	-	-	-

SCHREIBER, FABIAN 200310231111300

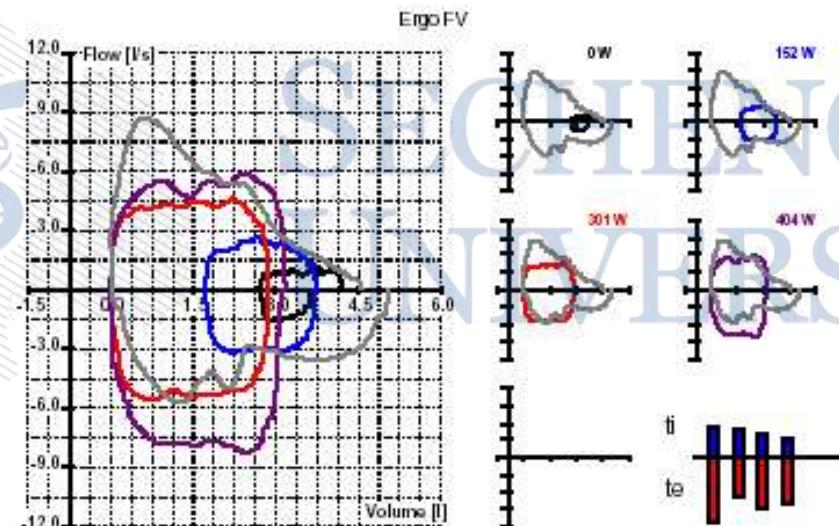
25.04.2004 / 10:43



Представление результатов теста

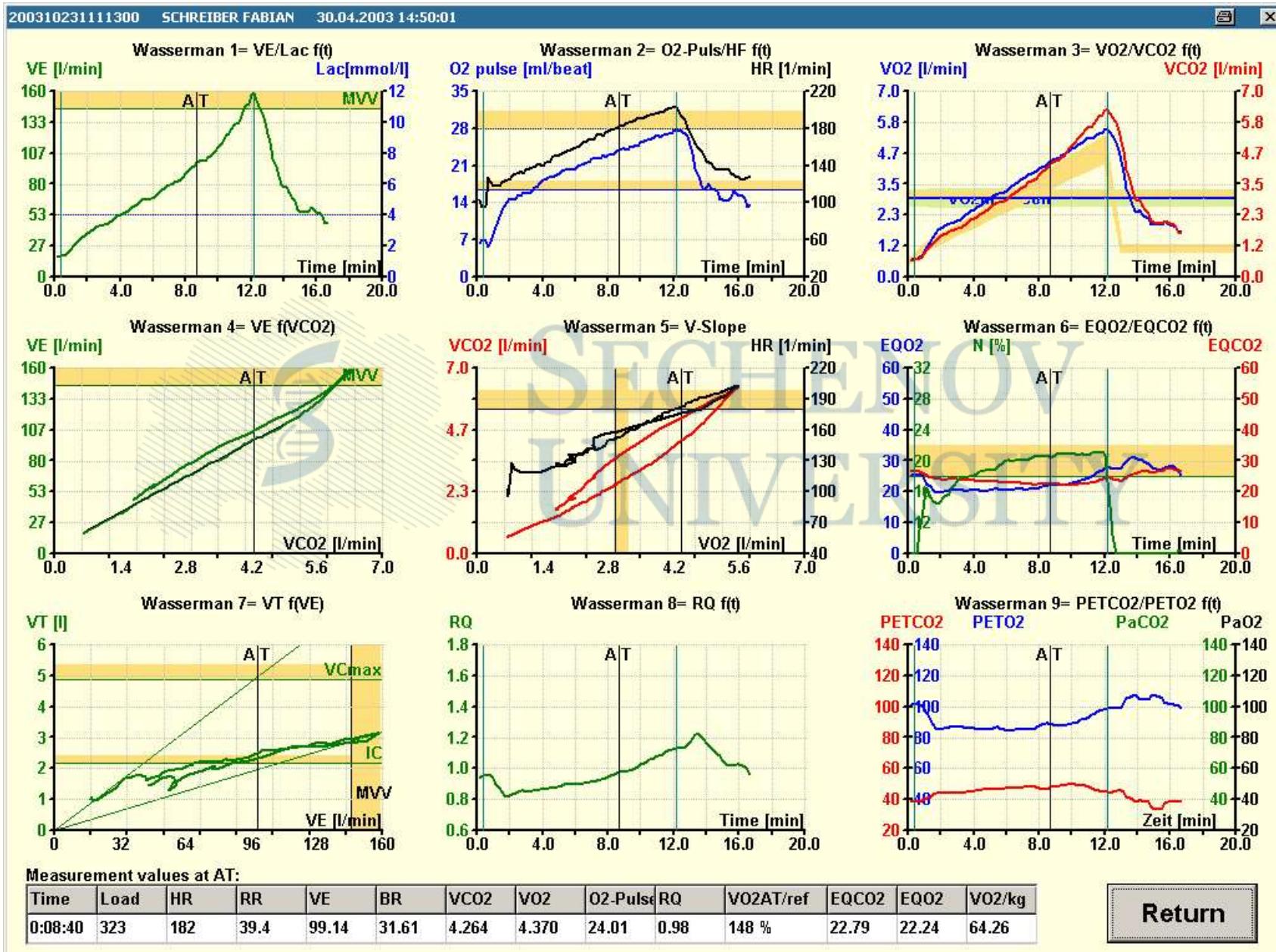
SCHILLER AG
Altgasse 68
6341 Baar Switzerland
www.schiller.ch

Last name: SCHREIBER 19 Years Hb value:
First name: FABIAN 184 cm Indication:
Date of birth: 25.01.1984 68 kg Nurse:
IDNR: 200310231111300 male Physician:
30.04.2008 / 14:50 Temperature 25.7 °C P amb. abs. rel.: 981/981 hPa Rel. humid.: 50 % rel. 25.04.2004 / 10:34
Pred. val.: Wasserman, Jones Gersheim PowerCube LFB 4F Release 9



F/V-No.	1	2	3	4	5
P Watt	-	152.00	301.00	404.00	-
Time min	-	3.00	8.00	11.00	-
EILV l	2.70	1.72	-	-	-
EELV l	4.16	3.71	2.84	3.14	-
VT l	1.46	1.99	2.84	3.14	-
ti s	0.82	0.73	0.66	0.52	-
te s	1.73	1.04	1.37	1.25	-
EMF ls	1.23	2.69	4.67	5.85	-
IMF ls	1.54	3.16	5.61	8.21	-
VII l	-	-	-	-	-
VII/VT %	-	-	-	-	-
EILV/VC %	46.48	66.00	-	-	-

Основные показатели эргоспирометрии



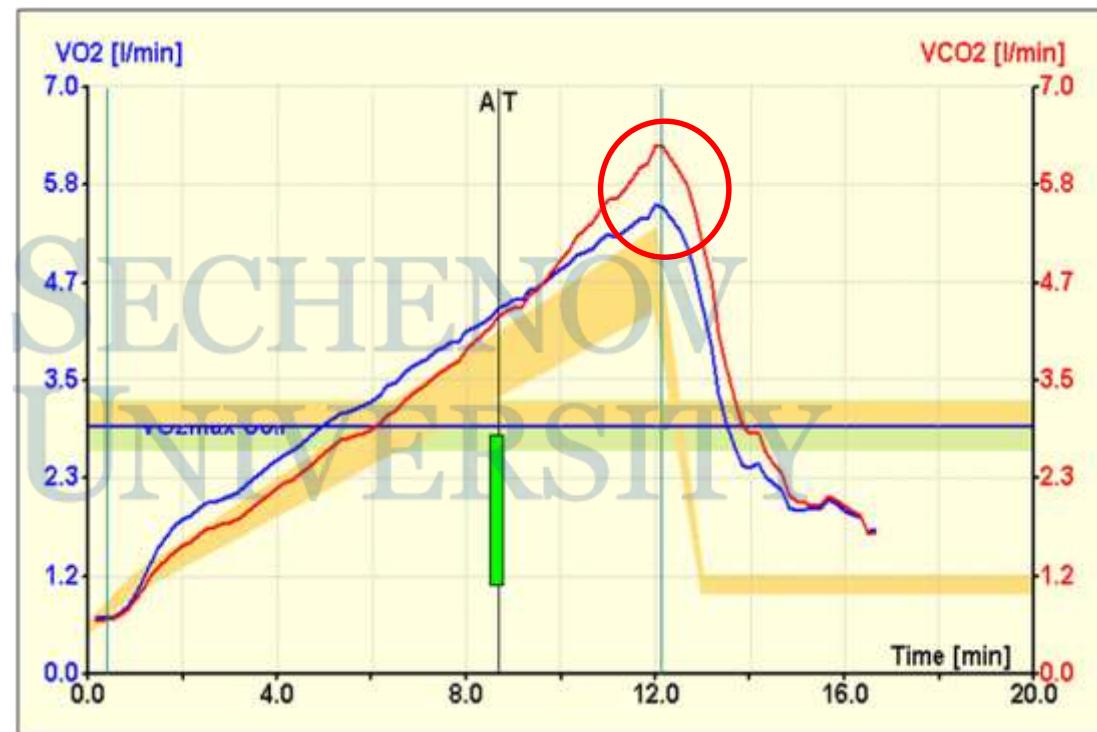
Основные показатели эргоспирометрии

VO₂ peak – пиковое потребление кислорода (л/мин, мл/мин х кг)

VCO₂ – выделение углекислого газа (л/мин, мл/мин х кг)

VE – минутная лёгочная вентиляция (л/мин)

АП – потребление кислорода на уровне анаэробного порога (л/мин, мл/мин х кг)



Основные показатели эргоспирометрии

RER (respiratory exchange ratio) – разница между выдыхаемым CO₂ и вдыхаемым O₂ – показатель прилагаемого усилия

O₂/пульс – кислородный пульс (мл O₂/ЧСС) – отражает изменение ударного объема

PetCO₂ (partial pressure of end-tidal CO₂) – напряжение CO₂ в конце выдоха (мм рт.ст.) – отражает концентрацию CO₂ в выдыхаемом воздухе

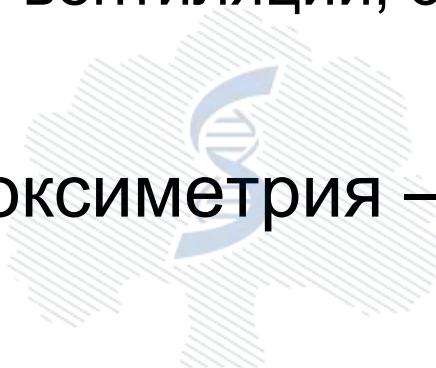
VE/MVV – отношение максимальной минутной вентиляции во время нагрузки к максимальной **произвольной** вентиляции

Основные показатели эргоспирометрии

VE/VCO₂ slope – эффективность вентиляции, соотношение вентиляции и перфузии

Осцилляторная вентиляция – особый осцилляторный паттерн вентиляции, связанный с прогнозом у пациентов с ХСН

Пульсоксиметрия – насыщение крови О₂



SECHENOV
UNIVERSITY

ПИКОВАЯ (МАКСИМАЛЬНАЯ) ФИЗИЧЕСКАЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

Предел ↑ сердечного
выброса
(сократительный резерв)

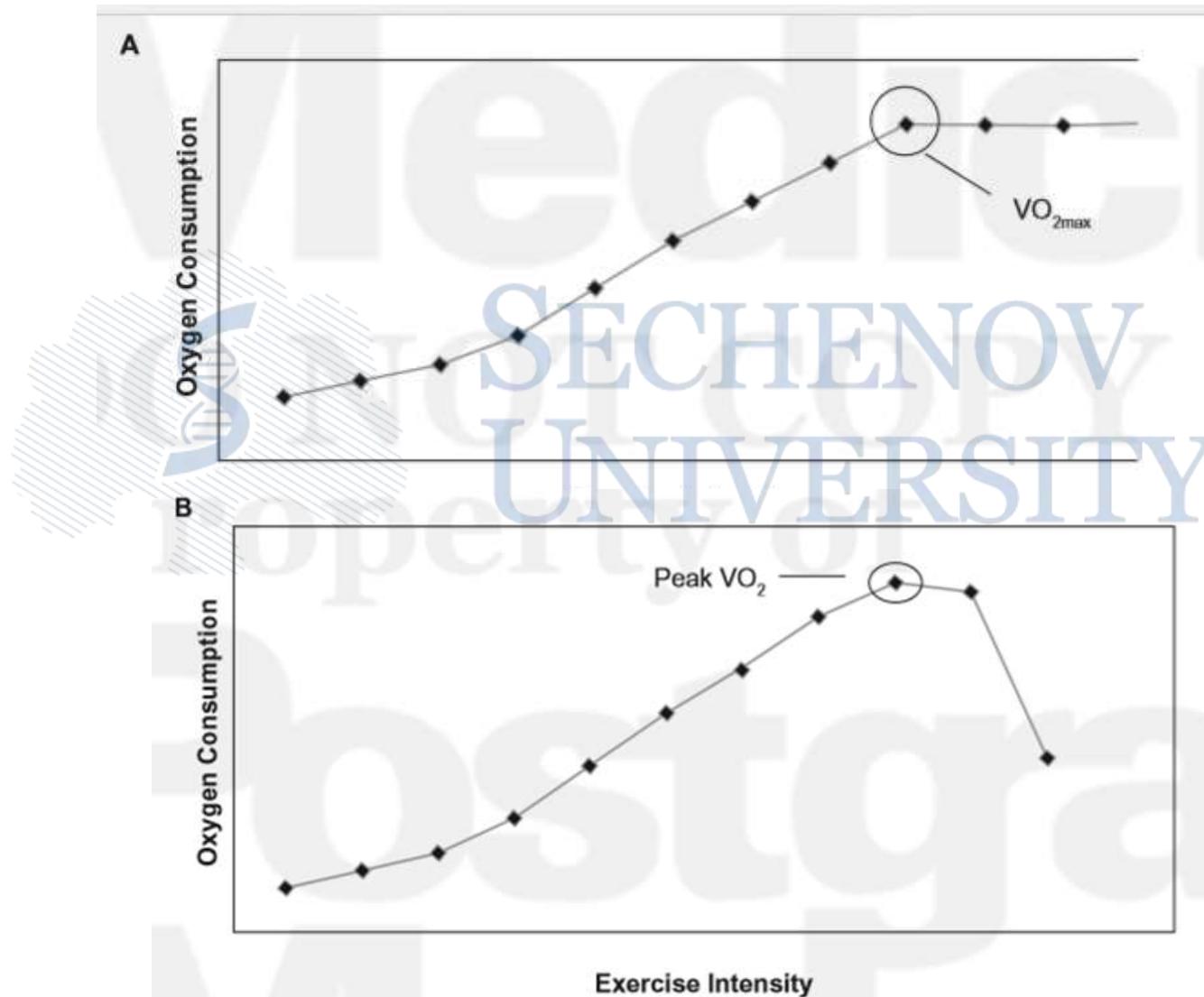
Предел экстракции O_2
(70-80%)

Предел роста потребления O_2 – максимальная физическая
рабочоспособность

Пиковое VO_2 (VO_2 peak) или максимальное VO_2 (VO_2 max)



Максимальная vs. Пиковая работоспособность



Физиологический ответ на нагрузку

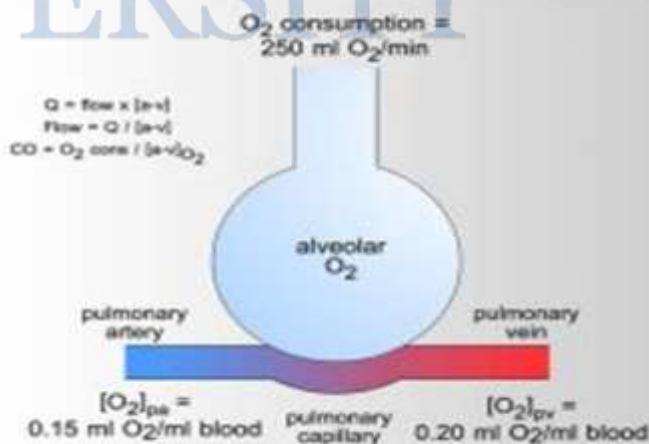
Уравнение Фика

$$\text{Resting } \text{VO}_2 = \text{C.O.} \times \text{A-VO}_2 \text{ Difference}$$

$$\text{Maximal Exercise } \text{VO}_2 = \text{C.O.} \times \text{A-VO}_2 \text{ Difference}$$

$$= \text{HR (2-3x resting)} \times \text{SV (2x resting)} \times \text{A-VO}_2 \text{ Difference (3x resting)}$$

Снижение VO_2 peak
обусловлено факторами
нарушающими
доставку кислорода
либо
утилизацию кислорода



¹ Adolf Fick (1870)

Оценка функциональных нарушений при ХСН

Функциональный класс

Повседневная активность

Вопросники

Тесты с дозированной ходьбой (6-мин)

Нагрузочные тесты без газового анализа (мощность и время нагрузки, вычисленное потребление O_2 (МЕТ)

Нагрузочные тесты с измерением потребления $O_{2\text{peak}}$ (АП)

Субъективный метод, низкая корреляция с VO_2

Субъективный метод, низкая/умеренная корреляция с VO_2

Умеренная корреляция с VO_2 . Результаты зависят от мотивации, трудно оценить усилие больного

Умеренная воспроизводимость, вычисленное потребление O_2 может превышать истинное

«Золотой стандарт» оценки толерантности к нагрузке, высокая воспроизводимость

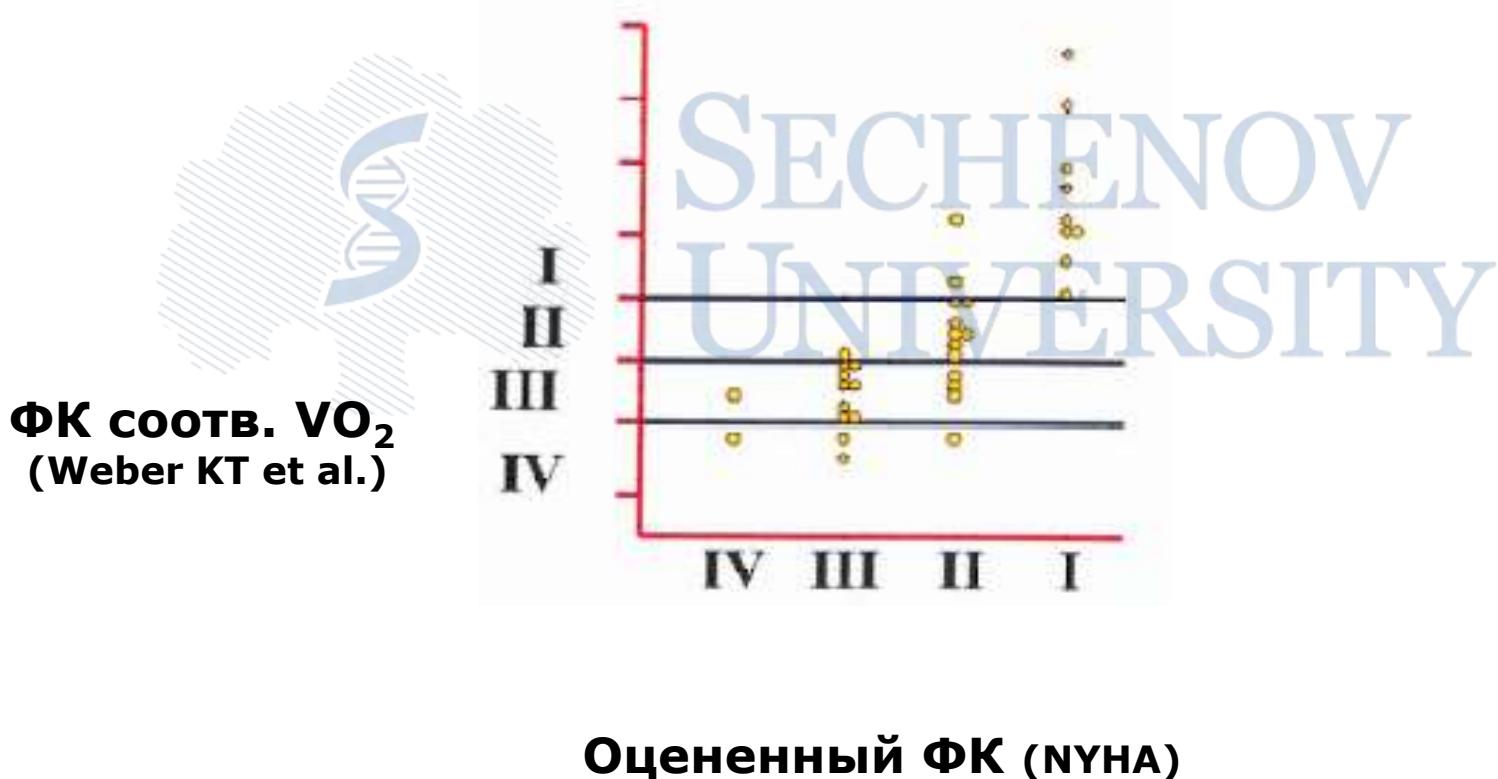
СВЯЗЬ VO₂peak И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Выдающийся спортсмен **60-80**

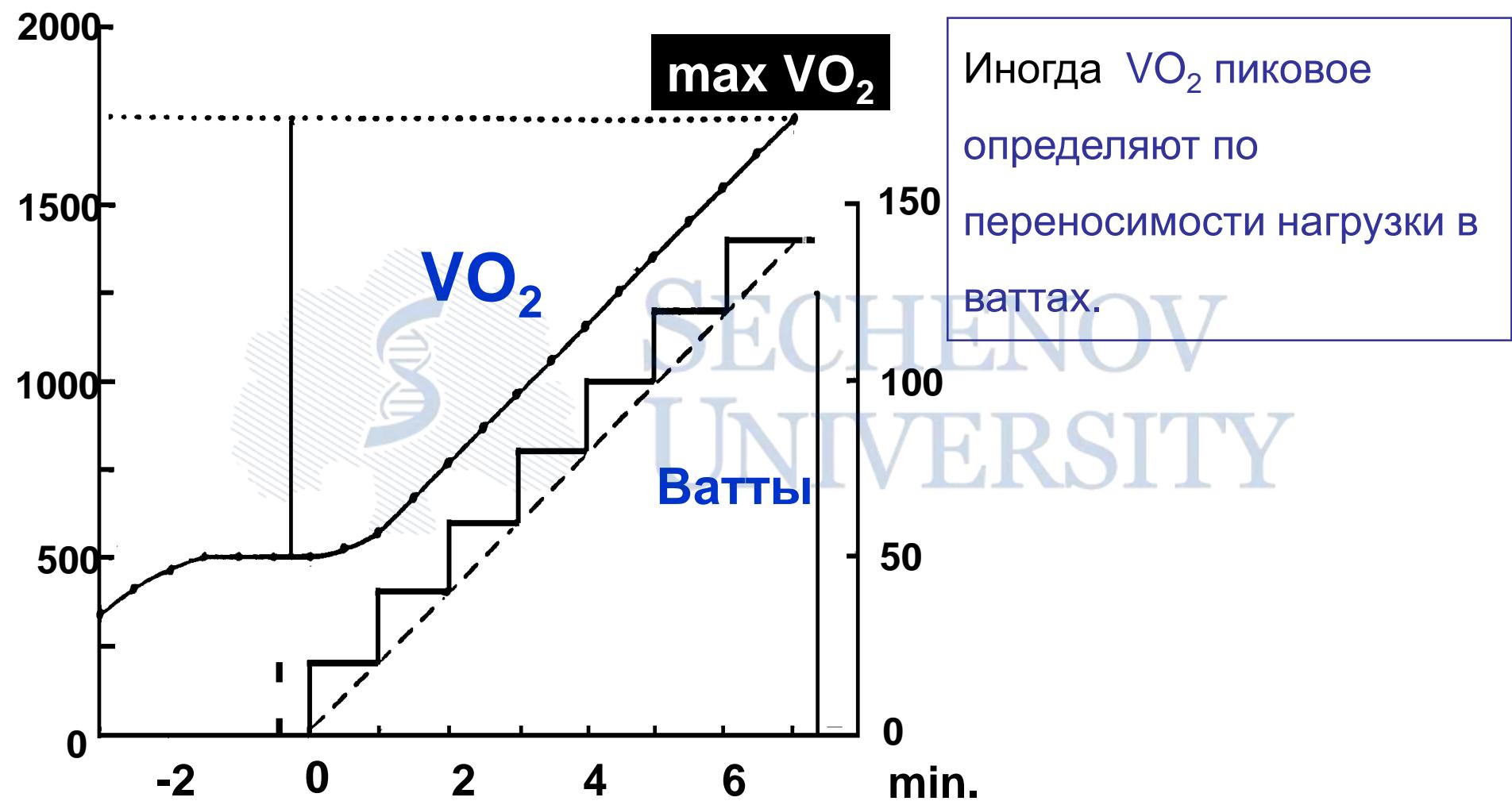
**Здоровый
нетренированный** **21-29**

Класс	Тяжесть ХСН	VO ₂ peak мл/мин/кг	VO ₂ AT мл/мин/кг	Макс. сердечный индекс (л/мин/м ²)
A	Отсутствует-легкая	>20	>14	> 8
B	Легкая-умеренная	16-20	11-14	6-8
C	Умеренная- выраженная	10-16	8-11	4-6
D	Тяжелая	6-10	5-8	< 4

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КЛАСС – ОЦЕНКА ИЛИ ИЗМЕРЕНИЕ?

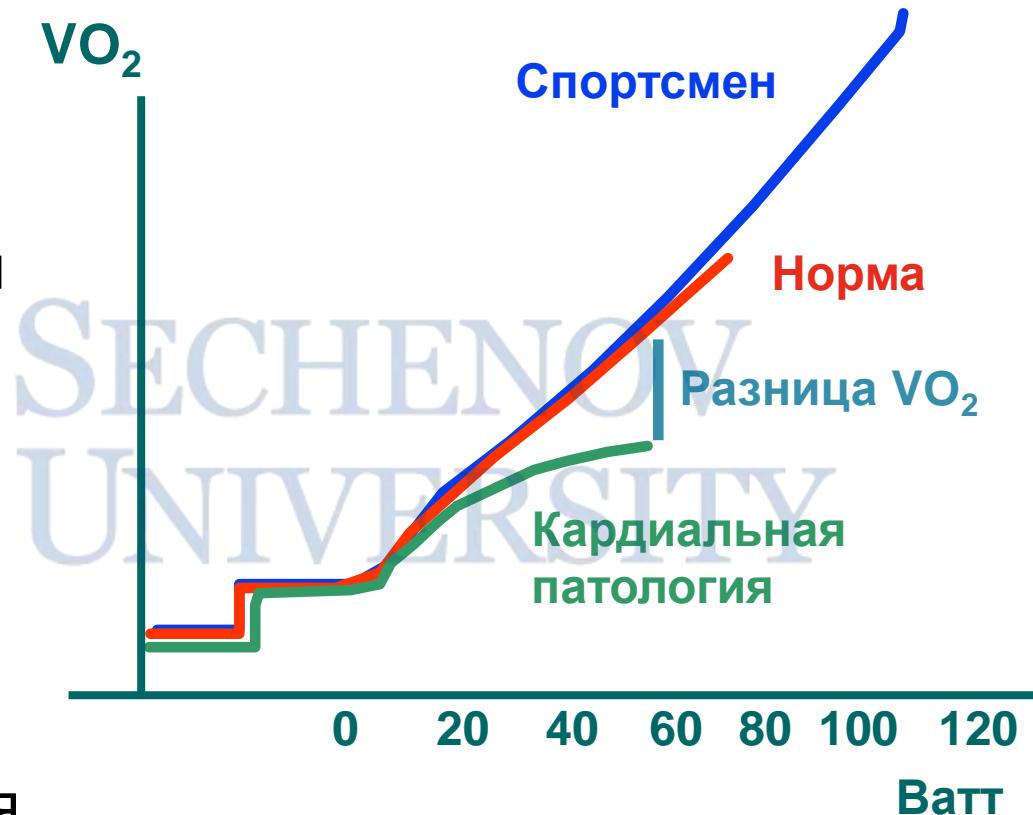


VO_2 ЛИНЕЙНО СВЯЗАН С РАБОТОЙ

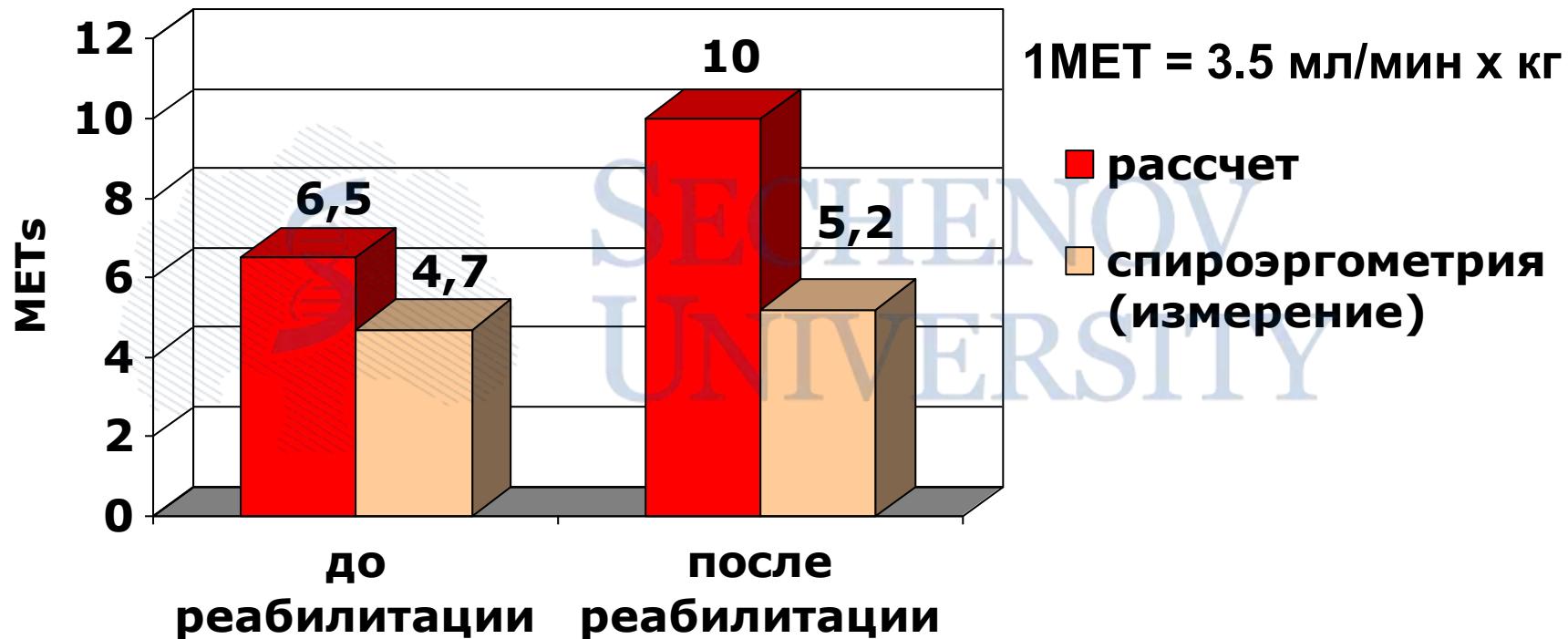


НАГРУЗКА НЕ ОТРАЖАЕТ VO_2

- Плохая калибровка эргометра
- Ожирение
- Клапанная патология
- ИБС
- Кардиомиопатия
- Перемежающаяся хромота
- Легочная гипертензия



ВЕЛИКА ЛИ ОШИБКА ПРИ РАСЧЕТЕ?



Переоценка на 38% до реабилитации и 93% после нее

ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ VO_2

VO_2 peak
мл/мин/кг

Прогноз на 1 год

≤ 10

($\leq 14^*$

в сочетании с низким
САД)

10 - 18

>18

Плохой

(максимальная смертность)

Высокий риск «больших»
хирургических операций

Промежуточный

Хороший

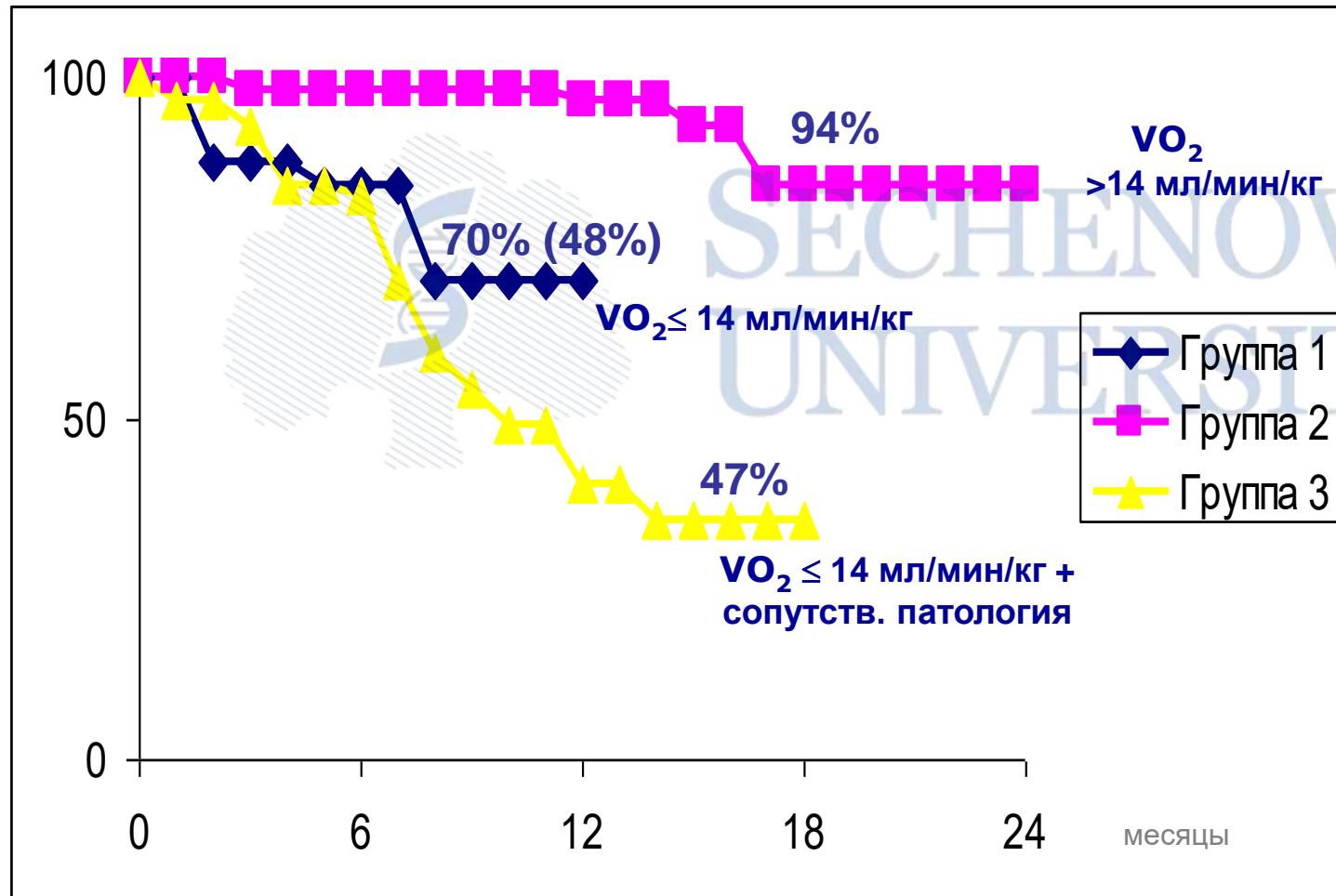
*включая пациентов
с клапанными пороками

Gitt K et al in: *Cardiopulmonary exercise testing
and cardiovascular health.*
Editor Wasserman K 2002; *Futura publ*:63-77

Myers J et al. *Ann Intern Med* 1998;129:286-293

ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ VO_2 ПРИ ХСН

Выживаемость, %



ОЦЕНКА ПРОГНОЗА БОЛЬНЫХ ДО КАРДИОРЕАБИЛИТАЦИИ

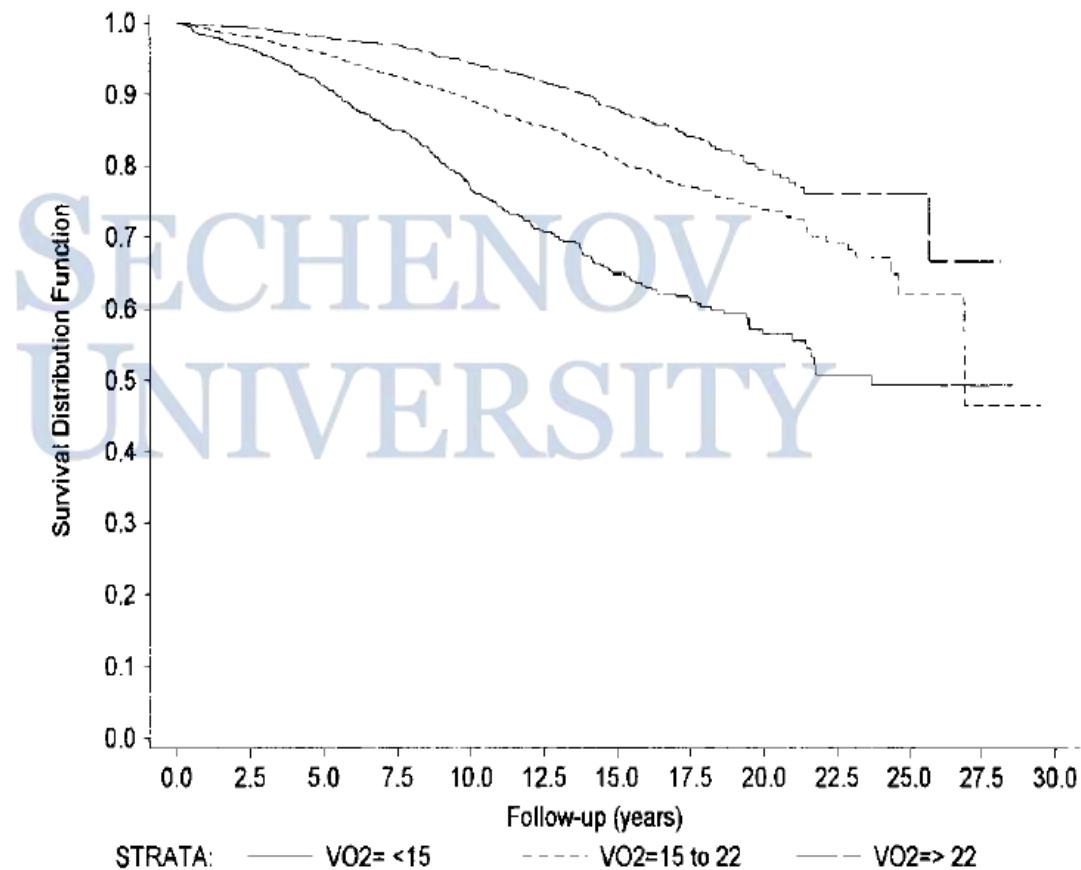
12169 мужчин: ИМ,
АКШ, ИБС

4-29 (7.9) лет
наблюдения

1336 смертей от ИБС

2352 смертей от других
причин

VO_2 peak – независимый
предиктор



Prediction of Long-Term Prognosis in 12169 Men Referred for Cardiac Rehabilitation. T Kavanagh et al. Circulation 2002; 106: 666-671.

Prediction of Long-Term Prognosis in 12 169 Men Referred for Cardiac Rehabilitation

Terence Kavanagh, MD, FRCP(C); Donald J. Mertens, MD, MSc; Larry F. Hamm, PhD; Joseph Beyene, PhD; Johanna Kennedy, RN; Paul Corey, PhD; Roy J. Shephard, MD, PhD

Background—Predicting the risk of cardiac and all-cause death in patients with established coronary heart disease is important in counseling the individual and designing risk-stratified rehabilitation and secondary prevention programs. Cox proportional hazards and Kaplan-Meier survival curves were thus completed on initial assessment data obtained from patients referred to an outpatient cardiac rehabilitation center.

Conclusions
Whether a cardiac patient is referred for rehabilitation after an acute myocardial infarction (MI), coronary artery bypass grafting (CABG), or the onset of ischaemic heart disease (IHD), the most important predictor of both cardiac and all-cause deaths is the $\dot{V}\text{O}_{2\text{peak}}$.

Conclusions—Exercise prognosis in men at (Circulation. 2002;106:1611-1616)

Conclusions

Whether a cardiac patient is referred for rehabilitation after MI, CABG, or the onset of IHD, the most important single predictor of both cardiac and all-cause deaths is the $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ as measured by cardiorespiratory testing.

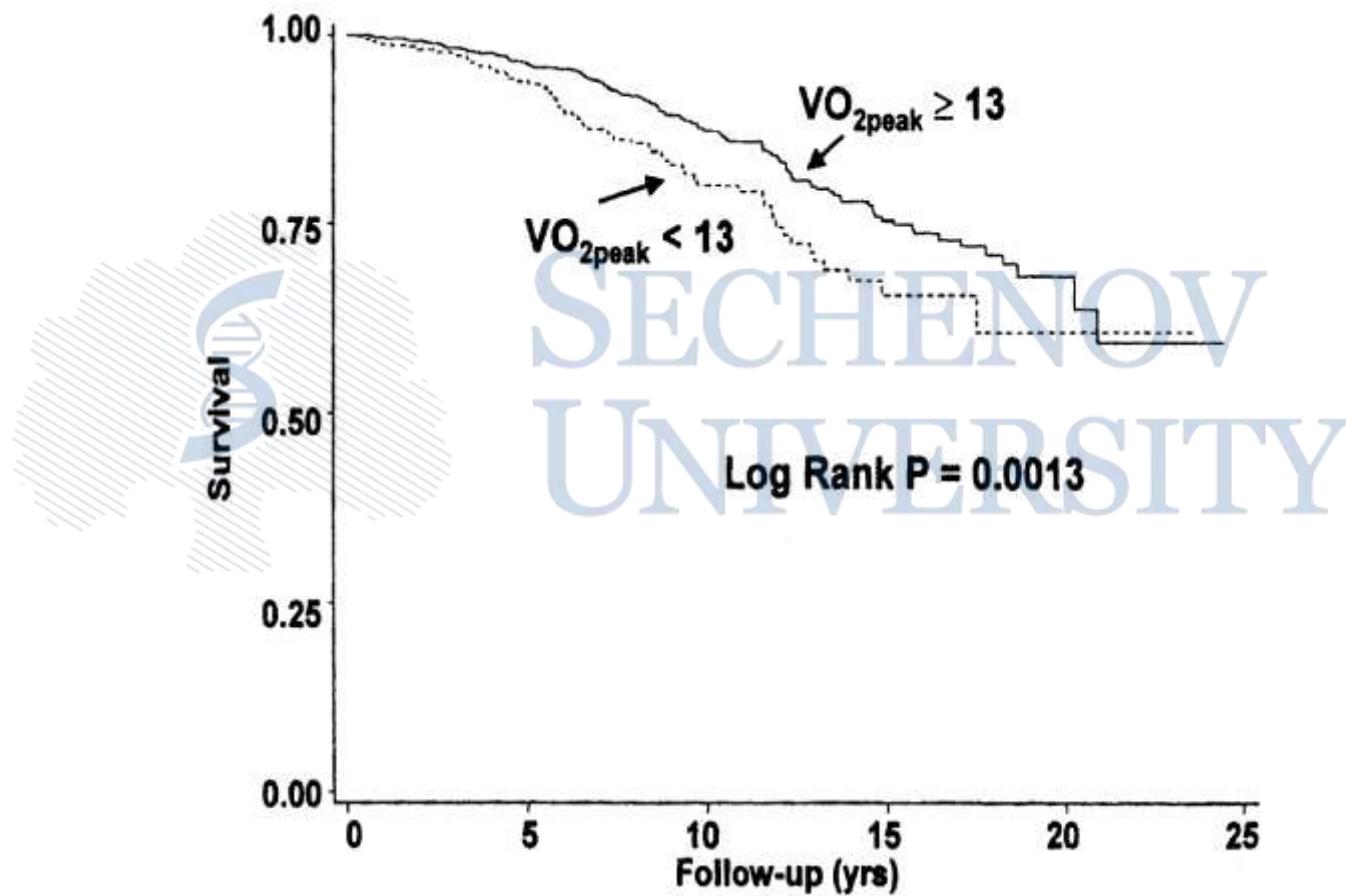
Key Words: exercise ■ prognosis ■ coronary disease ■ survival

Previous authors have discussed the predictive value of exercise test data in subjects with established heart disease. However, conclusions were generally based on

cases of ischemic heart disease [IHD]), referred 13.4 ± 3.9 weeks after the event.

Follow-Up

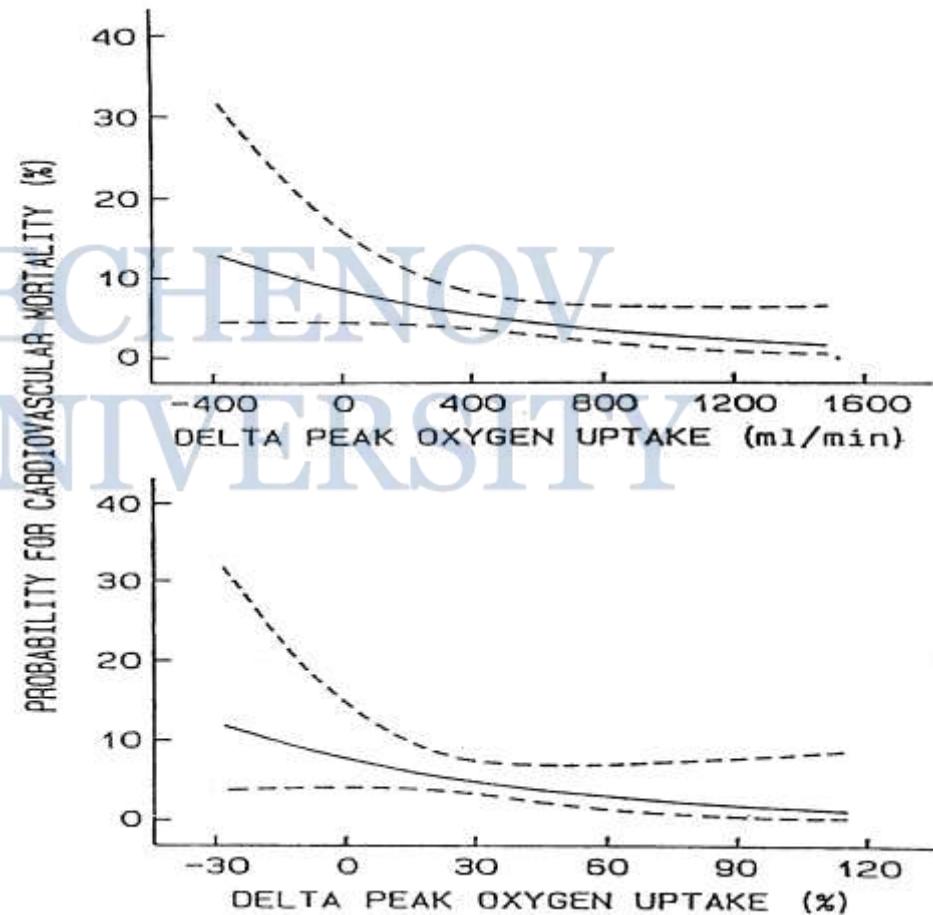
ОЦЕНКА ПРОГНОЗА У ЖЕНЩИН, БОЛЬНЫХ ИБС



Peak Oxygen Intake and Cardiac Mortality in Women Referred for Cardiac Rehabilitation. T Kavanagh, et al. J Am Coll Cardiol 2003; 42: 2139-43.

ЭРГОСПИРОМЕТРИЯ – ОЦЕНКА ДИНАМИКИ $VO_2\text{peak}$

- Увеличение переносимости нагрузок на 1% снижает смертность от ИБС на 2%
- Изменение $VO_2\text{peak}$ независимый предиктор

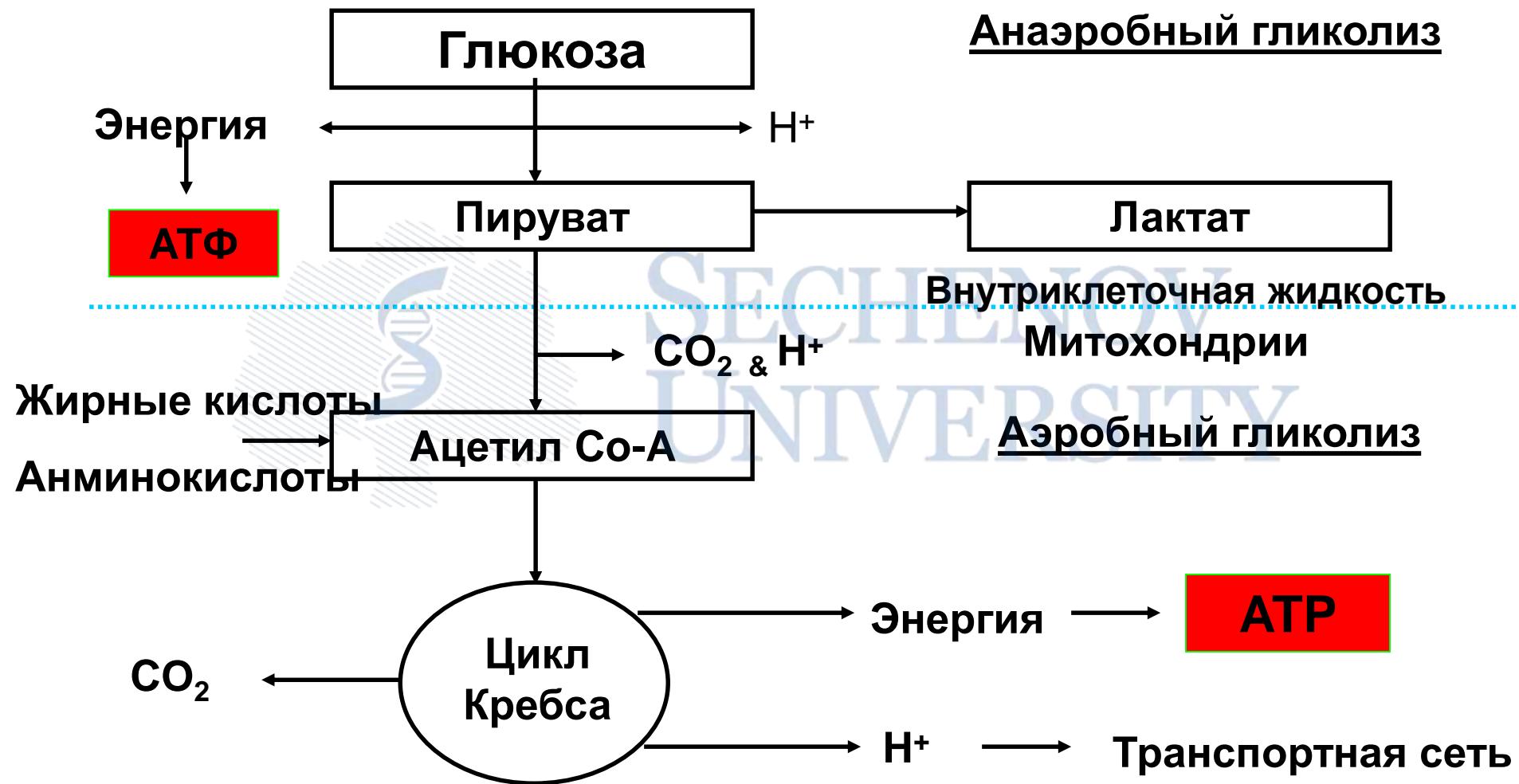


Prognostic Value of Training-Induced Change in Peak Exercise Capacity in Patients With Myocardial Infarcts and Patients With Coronary Bypass Surgery. Vanhess L et al. Am J Cardiol 1995; 76: 1014-19.

ВЕНТИЛЯТОРНЫЙ ПОРОГ (=анаэробный порог)

- Момент, при котором вентиляция начинает расти непропорционально приросту нагрузки.
- Связан с накоплением в крови лактата
- Не зависит от максимального усилия.
- Отражает переносимость повседневных нагрузок.
- Имеет прогностическое значение.

Пути катаболизма глюкозы



Пути катаболизма глюкозы

- Аэробный

1 моль глюкозы \rightarrow 36 моль АТФ

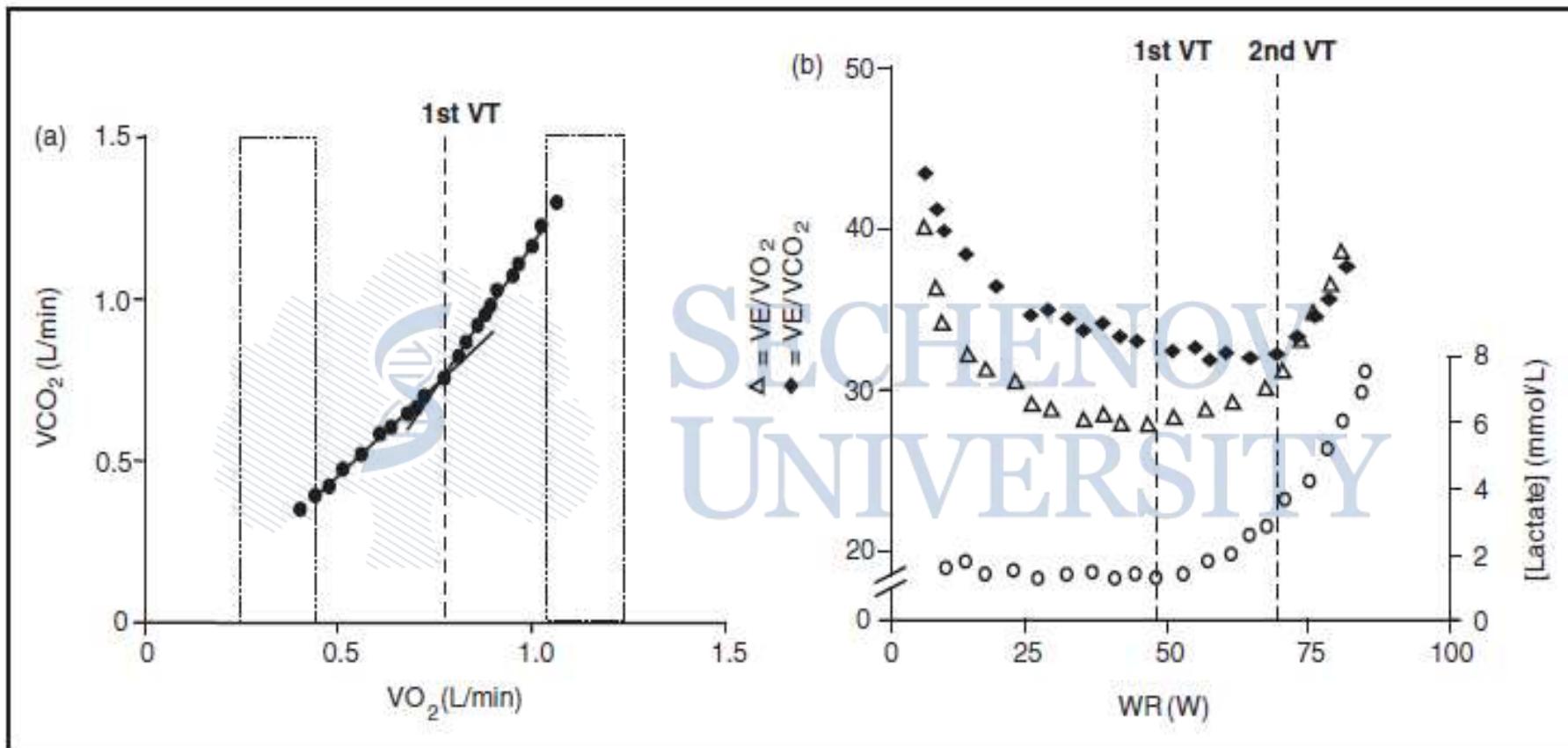


- Анаэробный

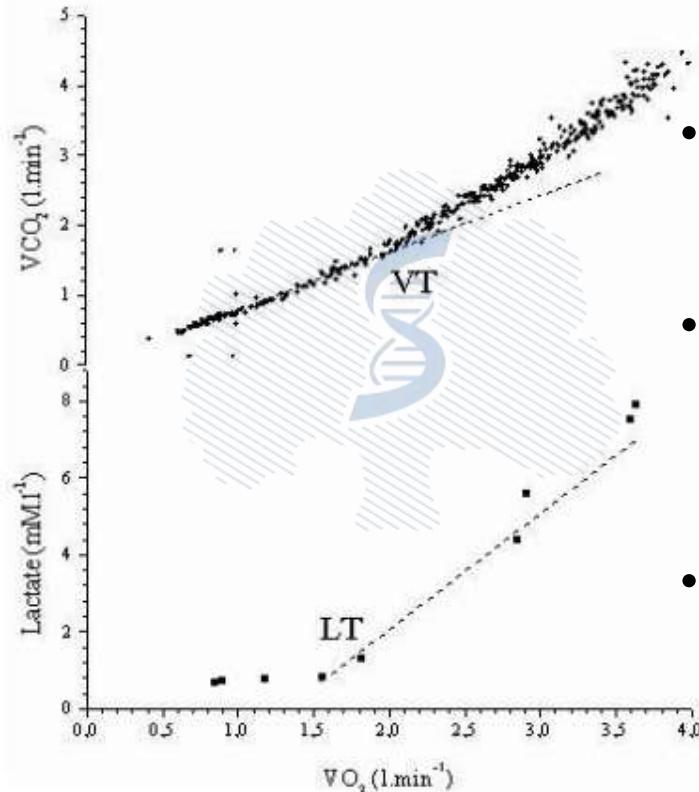
1 моль глюкозы \rightarrow 2 моль АТФ + 2 моль лактата



Вычисление анаэробного порога



«Talk test» – способность свободно поддерживать разговор свидетельствует о тренировки ниже анаэробного порога



- Валидирован у спортсменов, здоровых добровольцев и больных сердечно-сосудистыми заболеваниями
- Может использоваться при различных видах нагрузок на выносливость (тредмил, ходьба, бег, велоэргометр, эллипс, степ)
- Прост, не требует специального оборудования и персонала

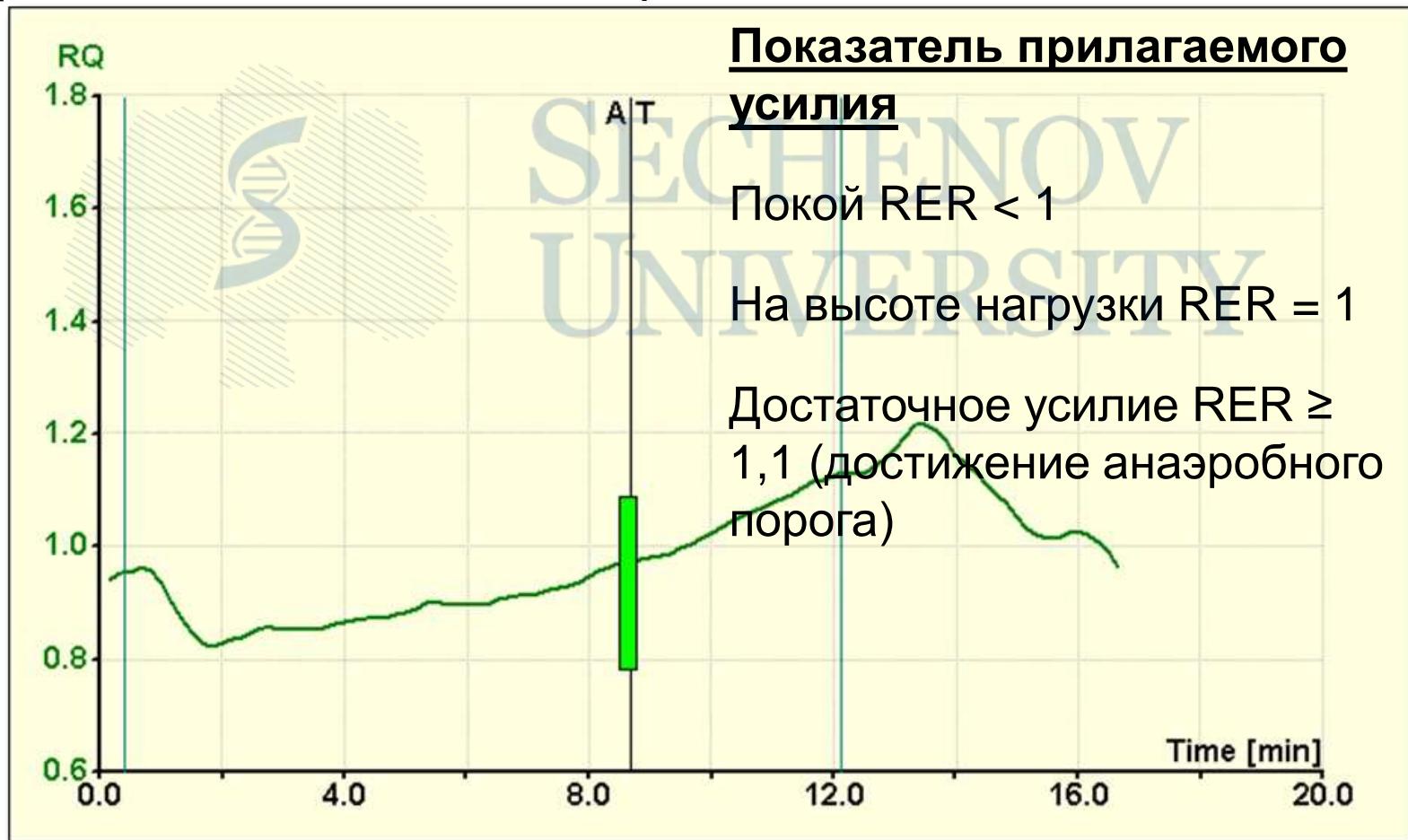
Reed JL, Pipe AL. *Curr Opin Cardiol.*
2014;29(5):475-80

RER – показатель прилагаемого усилия



RER – respiratory exchange ratio

Дыхательный коэффициент - разница между выделяемым лёгкими CO_2 и потребляемым O_2 за 1 мин ($\text{RER} = \text{VCO}_2/\text{VO}_2$)



Breathing reserve (BR)

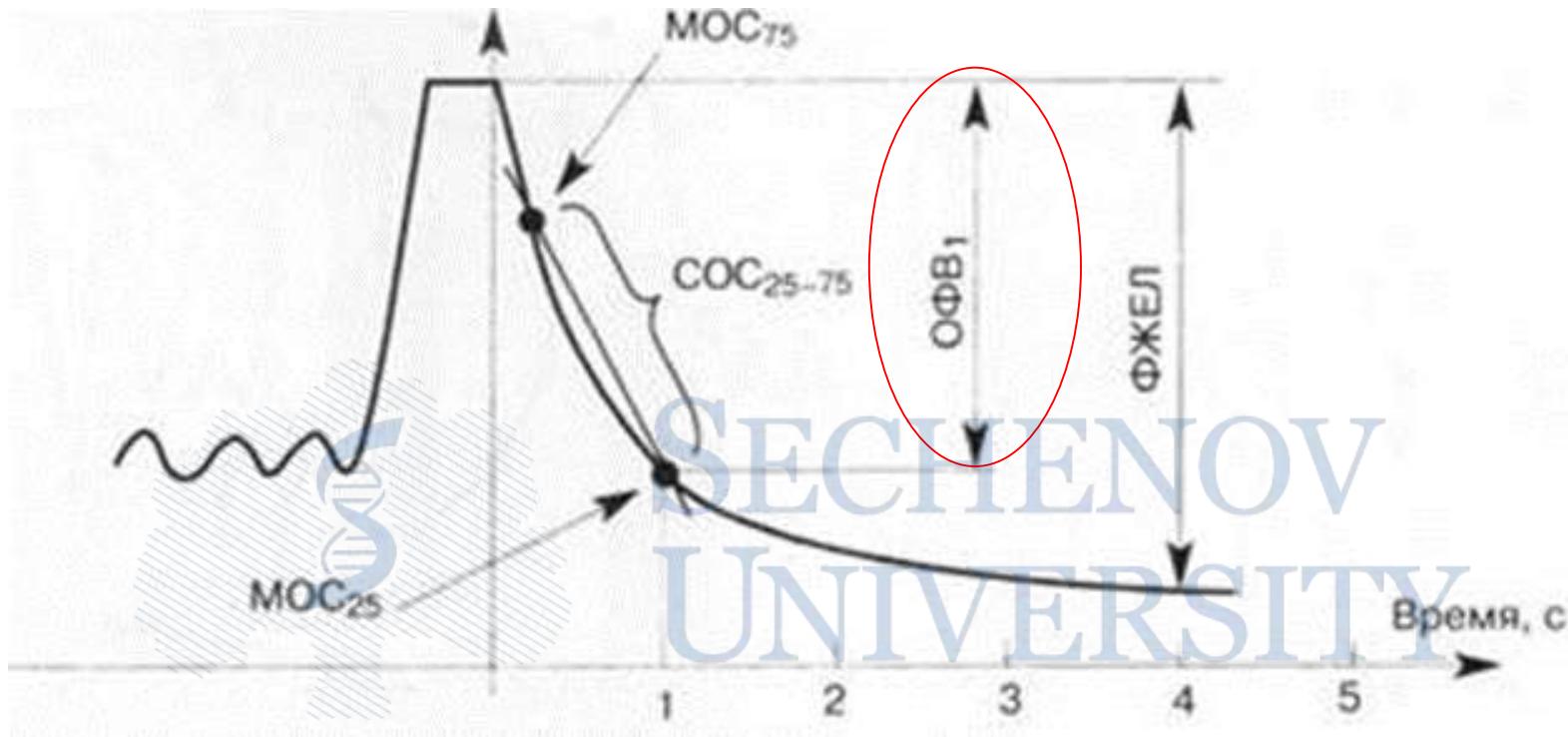
Дыхательный резерв (ДР) – разница между максимальной лёгочной вентиляцией на пике нагрузки (VE) и максимальной произвольной вентиляцией (MVV, max voluntary ventilation),

% от MVV, который не используется на пике нагрузки

$$\text{ДР} = 100 (\text{MVV} - \text{VE}) / \text{MVV}$$

Как рассчитать MVV?

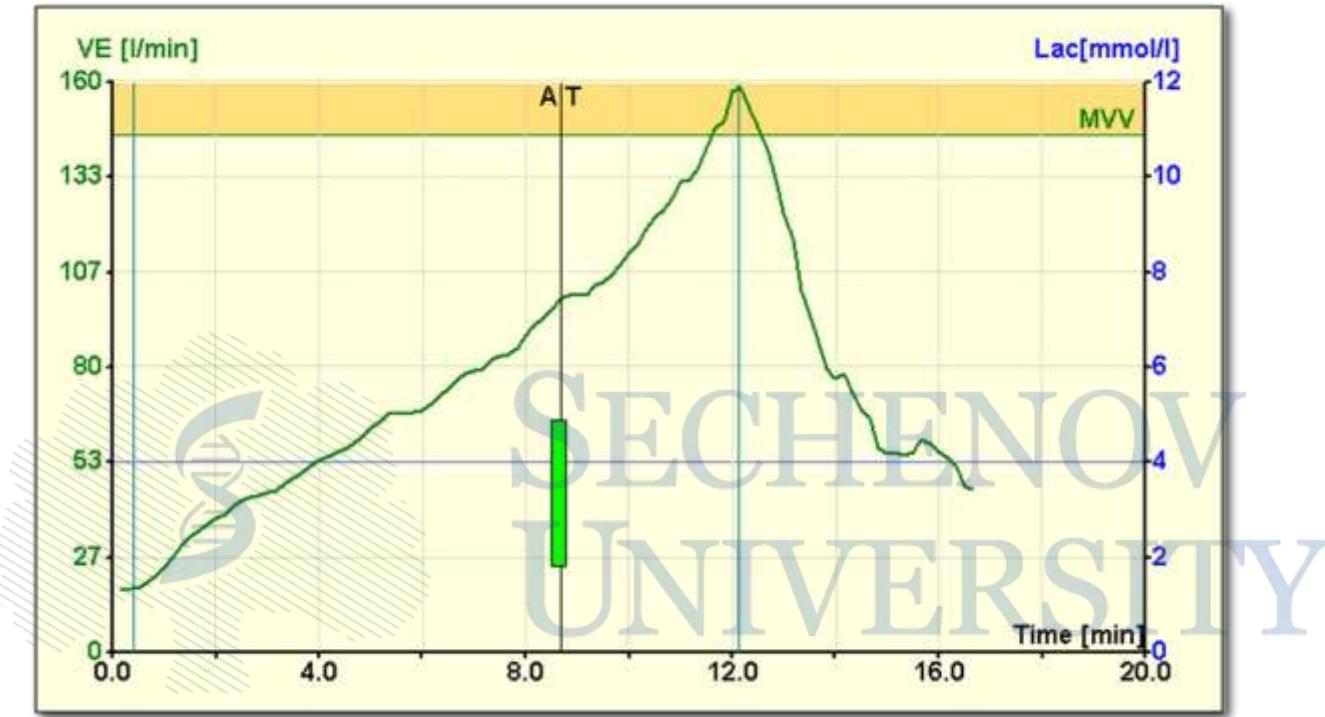
Breathing reserve (BR)



MVV – максимальный поток воздуха за первые 12-15 сек выдоха (в покое)

$$MVV = ОФВ1 \times 35 \text{ (40)}$$

Breathing reserve (BR)

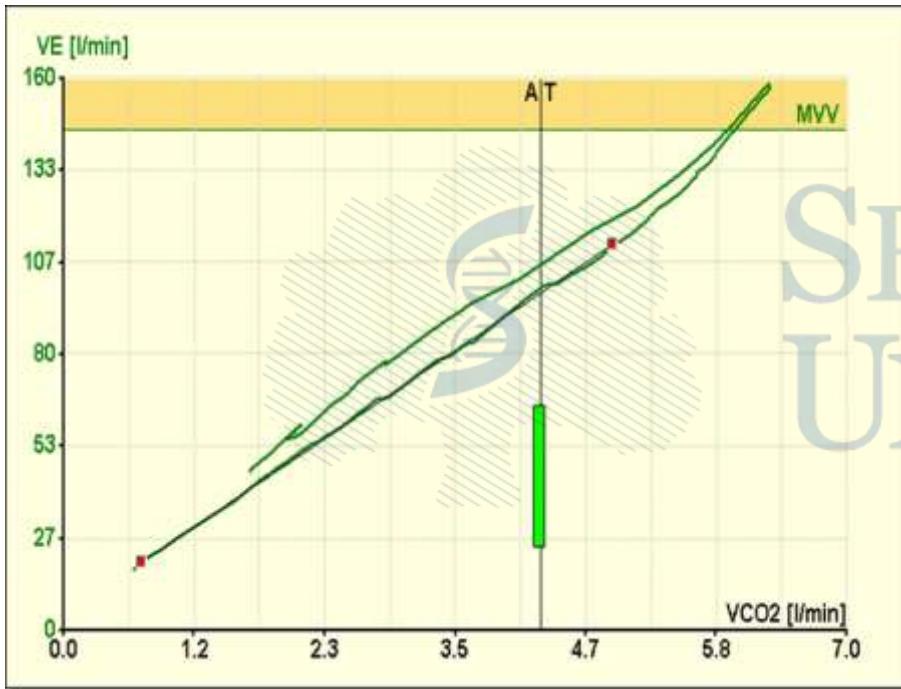


В норме MVV – VE \geq 11 л;

ДР \geq 20%

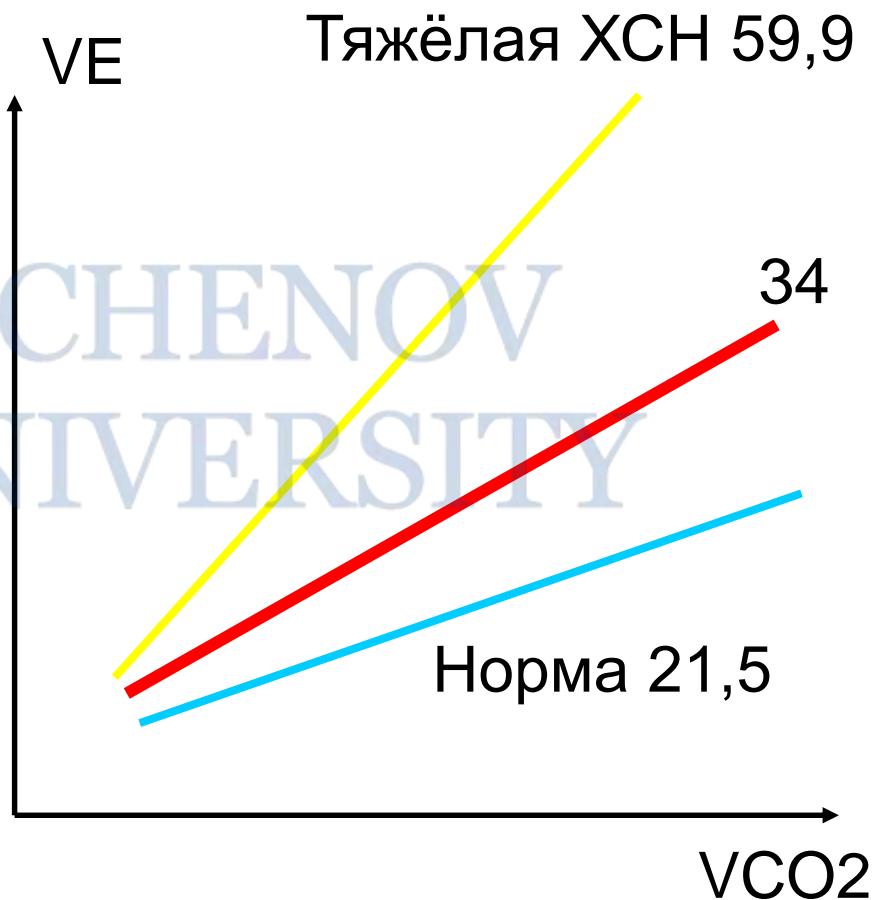
Эффективность лёгочной вентиляции

Определение



VE/VCO_2

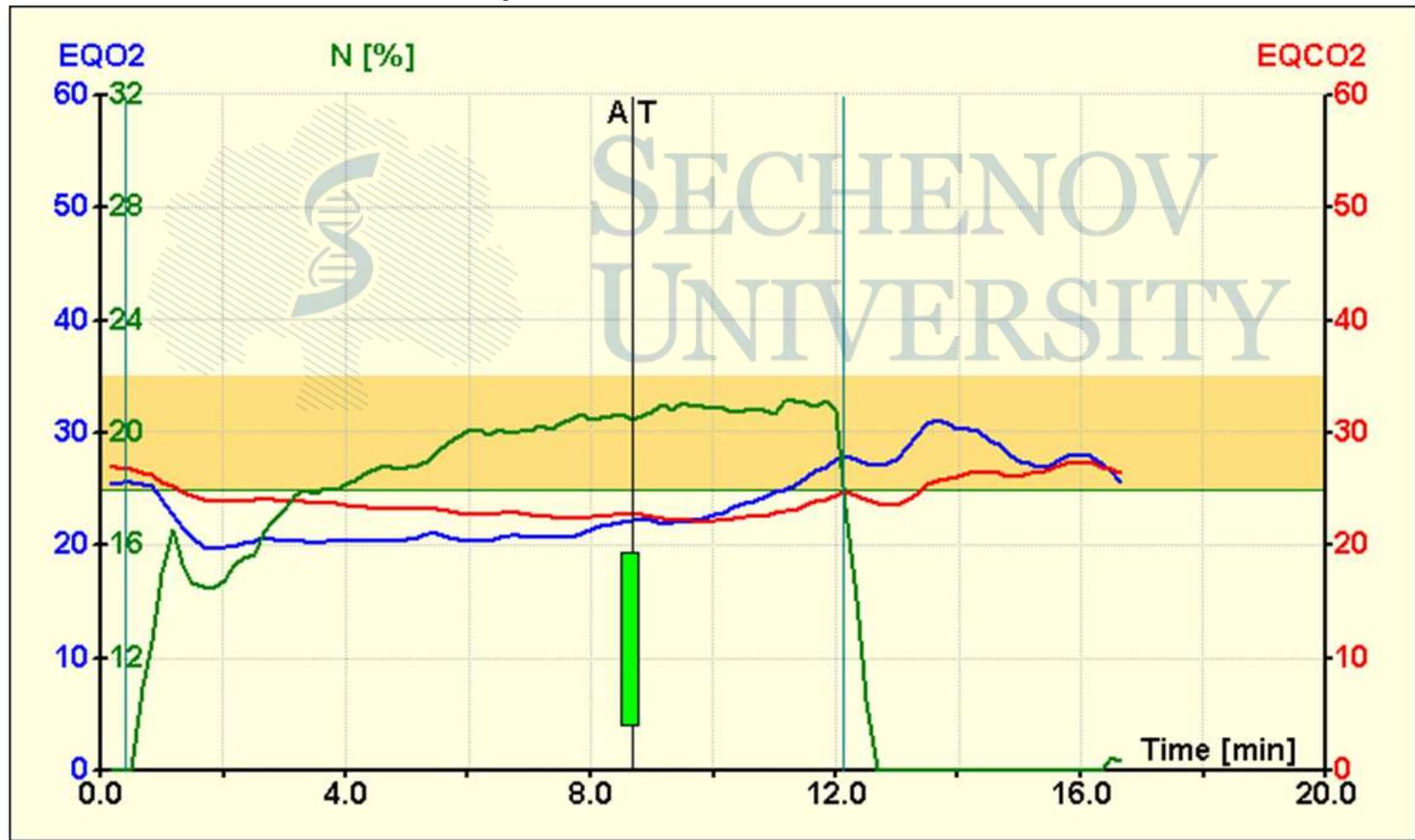
Прогностическая значимость



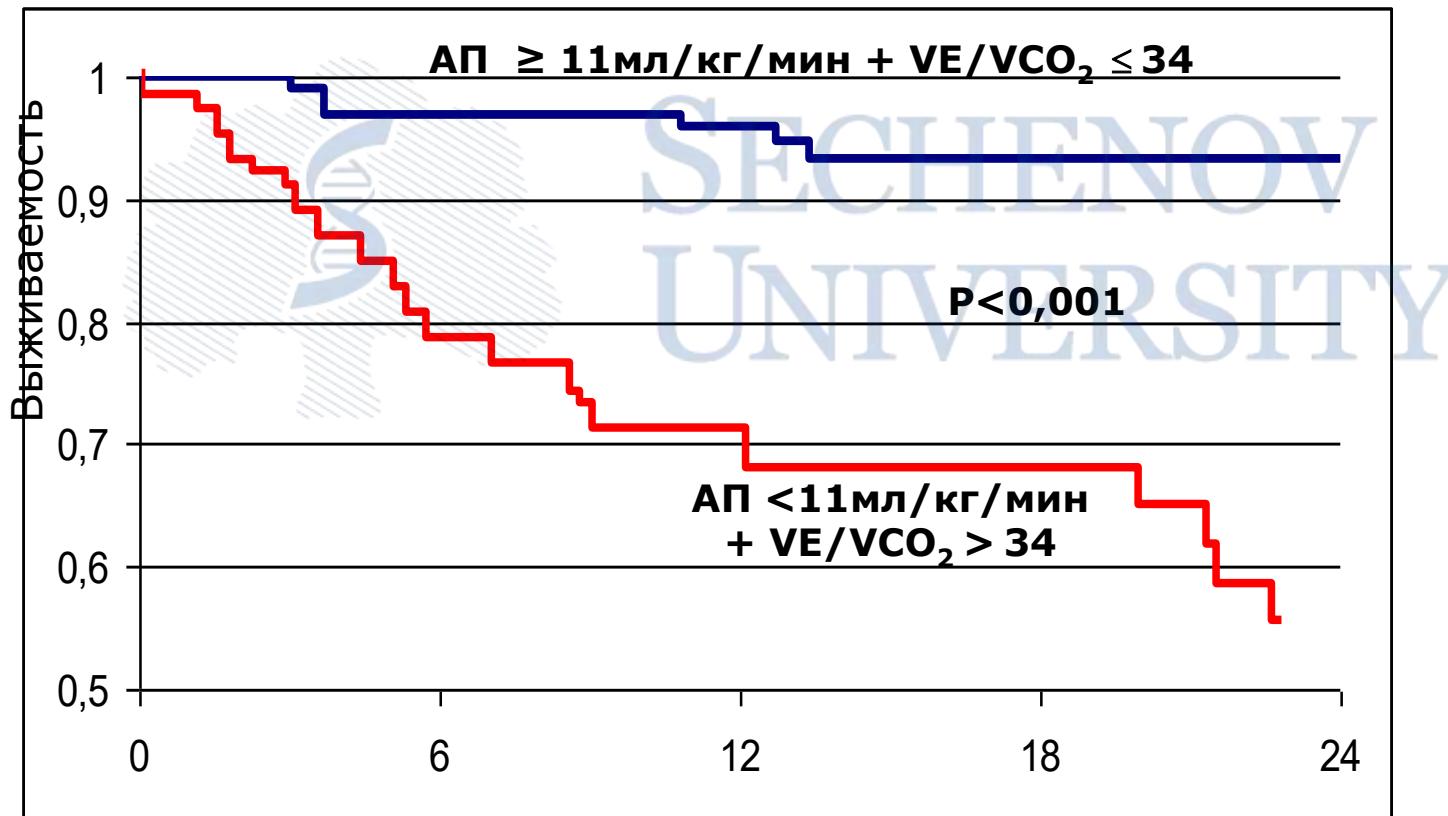
Metra M et al. Am J Cardiol 1992;70:622-628
Chua TP et al. J Am Coll Cardiol 1997;29:1585-1590

Вентиляционные эквиваленты по О2 и CO2

Количество воздуха, необходимое для поступления в организм 1 литра О2 (VE/VO2) и выделения 1 литра CO2 (VE/VCO2)



Прогностическое значение комбинации АП и эффективности вентиляции



Цит по: Wasserman K (ed) Cardiopulmonary exercise testing and cardiovascular health. Armonk, NY: Futura; 2002:71

Одышка/слабость при нагрузке: дифференциальный диагноз

Болезни

-легких:

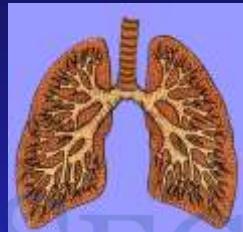
Обструктивные

Рестриктивные

Интерстициальные

-грудной клетки

$O_2 \downarrow$ $\uparrow CO_2$

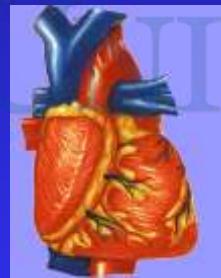


Патология легочных сосудов:
ТЭЛА

Легочная гипертензия

ИБС
ХСН
Анемия

Легочные
кровообращение O_2 CO_2



Патология
периферических
артерий

Ожирение
Миопатия

Детренированность

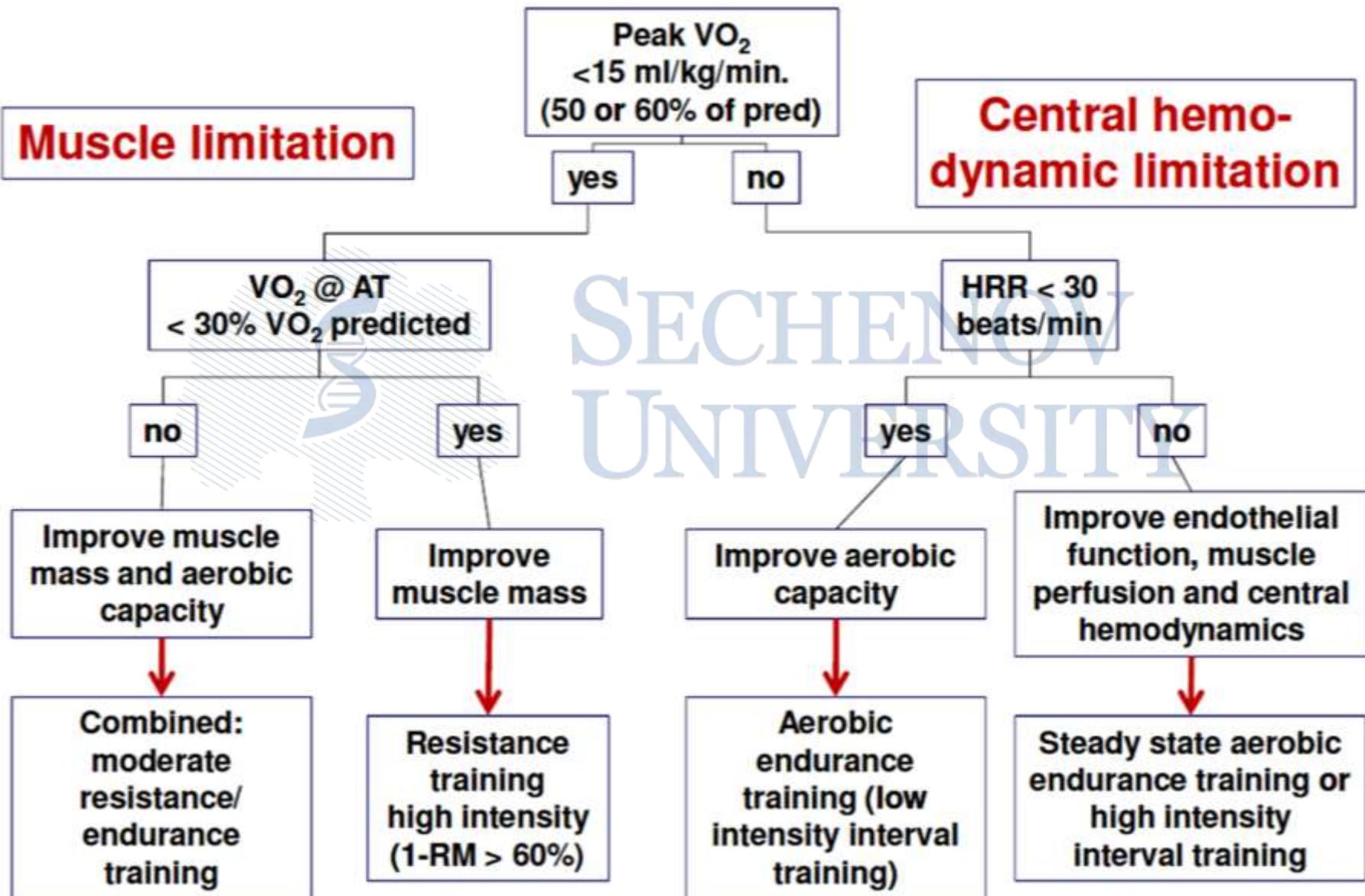
Системное
кровообращение O_2 CO_2



Wasserman K (ed) *Principles of exercise testing and interpretation*. Lippincott Williams & Wilkins; 2005, модиф.

CPX Response	Deconditioning	Chronic Heart Failure	Pulmonary Disease
Peak VO₂	Decreased relative to age- and gender-matched standards	Decreased relative to age- and gender-matched standards < 10 mL/kg/min consistent with very poor prognosis	Decreased relative to age- and gender-matched standards
VT	Occurs early relative to peak VO ₂ (< 30% peak VO ₂)	Occurs early relative to Peak VO ₂ (< 30% peak VO ₂)	Normal (40%–60% peak VO ₂)
VO₂/Work rate	Normal	Reduced slope < 10	Reduced slope < 10
O₂ pulse	Normal	Decreased	Normal
VE/VCO₂ slope	Normal (20–30)	High (30–60)	High (30–60)
Breathing reserve	Normal	Normal	Decreased
O₂ sat (Assessed by pulse oximetry or ABG)	Normal	Normal	Decreased
EOB	None	Can be present	Normal
PetCO₂	Normal	Low	Low (30–40 mm Hg)
VE/VO₂ slope			

Эргоспирометрия в кардиореабилитации



Потенциальные причины неудачных тестов

- Тест очень сильно зависит от мотивации пациента – «а я мог еще», «а что, нужно было больше?».
- Тест зависит от правильного инструктирования пациента (улучшение результата при правильном обучении).
- Тест трудоемок и для врача и пациента – общее время теста 40-60 минут.

Пути решения

- Мотивация
- Разъяснение
- Обучение – пробный тест
- Одно и тоже время теста
- Соблюдение условий проведения теста
(прием препаратов, пищи, курение, другие нагрузки)

ПРАВИЛЬНАЯ МОТИВАЦИЯ ДО ТЕСТА

