

**ГАЗООБМЕН МЕЖДУ ЧЕЛОВЕКОМ И КУЛЬТУРОЙ
МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В 30-СУТОЧНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Л. В. Киренский, И. А. Терсков, И. И. Гительзон,
Г. М. Лисовский, Б. Г. Ковров, Ф. Я. Сидько,
Ю. Н. Окладников, М. П. Антонюк, В. Н. Белянин,
М. С. Рерберг

Осуществление устойчивого непрерывного процесса микроводорослевого фотосинтеза в культиваторе, производительность которого может обеспечить метаболические потребности человеческого организма, позволило провести ряд экспериментов по длительному пребыванию человека в замкнутом объеме, в котором воздушная среда регенерируется с помощью фотосинтетического метода.

Основная задача работы заключалась в изучении возможности экспериментального осуществления системы биологической регенерации атмосферы с участием микроводорослей, на которые исследователи возлагают большие надежды с точки зрения использования их в качестве газообменника для космических кораблей.

Осуществление устойчивого интенсивного процесса нестерильного культивирования микроводорослей в герметичном культиваторе, описанного в предыдущем сообщении, позволило попытаться оценить обоснованность этих надежд в реальном эксперименте.

Для выяснения пригодности культиватора микроводорослей в качестве газообменника на обитаемом космическом корабле необходимо было прежде всего определить биологическую совместимость человека и водорослей, — затем исследовать количественную сторону газообмена в такой замкнутой системе.

С этой целью был произведен ряд исследований прямого газообмена человека с микроводорослевым культиватором. Длительность опытов увеличивалась от нескольких часов до 30 суток по мере накопления доказательств нетоксичности регенерируемой атмосферы для человека.

Опыты проводились в гермокамере, которая воздухопроводами соединялась с герметичным микроводорослевым культиватором. Объем кабины — 12 м³, площадь пола — 6 м².

Конструкция и оборудование кабины предусматривают обеспечение необходимых гигиенических и бытовых условий для обитания человека в течение многосуточных непрерывных опытов и возможность исследования некоторых физиологических его показателей.

Как правило, эксперименты проводились в 2 этапа: первый этап — культура микроводорослей вводилась в устойчивый режим фотосинтеза заданной интенсивности, затем культиватор замыкался по газообмену с кабиной, в которой создавалась исходная концентрация углекислоты порядка 1%.

Второй этап начинался входом испытателя в кабину и продолжался до окончания эксперимента.

Наличие кондиционирующего устройства позволяло в течение всех опытов поддерживать в кабине температуру примерно 24° и относительную влажность воздуха около 60%.

Для удаления специфического запаха микроводорослей был использован специальный фильтр с активированным углем марки АГ-3.

В экспериментах участвовали практически здоровые мужчины и женщины в возрасте от 20 до 33 лет.

В течение 4 недель до начала эксперимента клиническими и лабораторными методами устанавливался фон физиологических показате-

лей испытуемых, что позволяло контролировать реакции организма в ходе опыта и в период наблюдения после него.

В течение эксперимента испытуемые соблюдали режим максимально возможной активности, применяли дозированные по графику физические упражнения, кроме того, активно перемещались по кабине.

При наблюдении за состоянием испытуемого контролировались в динамике следующие физиологические параметры: температура и вес тела, артериальное давление, частота пульса и дыхания, продолжительность задержки последнего, легочные объемы, величина минутного объема дыхания, зрительно-моторная реакция, состояние механической памяти, объем внимания, динамометрия, электрокардиография, оксиметрия.

Особое внимание обращалось на возможное проявление сенсibilизации к веществам водородослевого происхождения.

Во время сна испытуемого его состояние непрерывно контролировали по ЭКГ, пневмограмме и пульсометрии.

Биологическая совместимость человека и микроводорослей

Газовый состав замкнутой атмосферы исследовался на содержание углекислоты и кислорода (непрерывно) и на окись углерода, аммиак, сероводород, меркаптаны, окислы азота, индол, скатол — периодически

Таблица 1
Средние значения некоторых физиологических показателей испытуемого в многосуточном опыте

Исследуемый показатель		Фоновые значения	Во время опыта	В период наблюдения после опыта
Задержка дыхания	после вдоха	$56,3 \pm 6,0$	$55,1 \pm 6,9$	$54,0 \pm 4,6$
	после нормального выдоха	$24,0 \pm 5,0$	$26,6 \pm 2,4$	$27,4 \pm 2,4$
Динамометрия	правой руки	$38,8 \pm 3,2$	$38,7 \pm 1,6$	$38,5 \pm 1,5$
	левой руки	$32,8 \pm 2,8$	$34,3 \pm 2,5$	$37,5 \pm 0,5$
Механическая память		$5,7 \pm 1,50$	$6,8 \pm 1,70$	$7,5 \pm 1,60$
Объем внимания		$4,1 \pm 1,04$	$4,8 \pm 0,80$	$4,3 \pm 0,89$
Зрительно-моторная реакция		$0,196 \pm 0,045$	$0,199 \pm 0,028$	$0,210 \pm 0,028$
Спирография	жизненная емкость легких	$2\,750 \pm 129,0$	$2,805 \pm 55,3$	$2\,725 \pm 35,8$
	дыхательный объем	$470 \pm 56,2$	$435 \pm 46,0$	$470 \pm 49,0$
	резервный объем	$1\,060 \pm 38,0$	$1\,055 \pm 56,0$	$1\,064 \pm 37,5$
	дополнительный объем	$1\,220 \pm 103,6$	$1\,315 \pm 76,0$	$1\,220 \pm 51,0$

(1 раз в сутки). С той же периодичностью контролировалась бактериофлора кабины.

За время опытов не было обнаружено накопления определявшихся вредных примесей в атмосфере кабины до опасных количеств; их концентрация в системе сохранялась на стабильном уровне.

Вселения бактериофлоры реактора в кабину не было обнаружено, несмотря на то что культивирование велось в нестерильных условиях.

Концентрация углекислоты в системе поддерживалась на уровне 1% с закономерными в течение суток колебаниями порядка $\pm 0,3\%$. Концентрация кислорода колебалась в пределах 20,6—22%.

Относительно высокая концентрация углекислоты поддерживалась для обеспечения необходимой интенсивности фотосинтеза микроводорослей.

В табл. 1 показаны средние величины ряда показателей, исследованных в одном из опытов длительностью 30 суток и последующем месячном наблюдении испытуемого.

В табл. 2 приведены результаты анализов крови испытуемых за то же время.

На рис. 1 приводится график динамики изменений некоторых физиологических параметров.

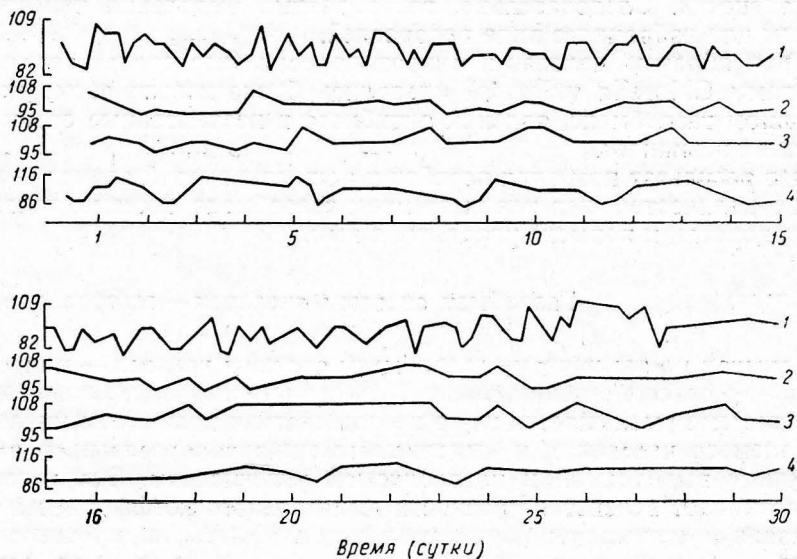


Рис. 1. Динамика физиолого-гигиенических параметров в 30-суточном опыте.

1—температура воздуха в кабине (в градусах); 2—относительная влажность воздуха (в %); 3—частота пульса; 4—температура тела (в градусах); 5—частота дыхания в минуту; 6, 7—артериальное давление: максимальное (6), минимальное (7).

Таблица 2

Картина периферической крови испытуемого до и после 30-суточного опыта (средние значения)

Исследуемый показатель	До опыта	После опыта
Эритроциты	3 982 000	3 995 000
Гемоглобин (в г%)	12,3	12,6
Цветной показатель	0,91	0,95
Тромбоциты	268 000	264 500
Лейкоциты	5 887	5 600
Реакция оседания эритроцитов (в мм в час)	15	13,5
Эозинофилы (в %)	2	2,4
Лимфоциты "	29,8	30,8
Моноциты "	6,6	5,4
Палочкоядерные "	2,6	3
Сегментоядерные "	59	58,4

У человека при концентрации углекислоты во вдыхаемом воздухе до 1,3% не отмечено никаких сдвигов в исследованиях физиологических параметров. При концентрации углекислоты в атмосфере кабины в пределах 1,3—1,7% появляется существенное увеличение минутного объема дыхания (до 15%) при сохранении фоновой концентрации углекислоты в альвеолярном воздухе и при неизменных значениях других исследованных параметров.

Уровень оксигенации крови увеличивался на 1,2% при концентрации углекислоты до 1,3% и на 2,5% при концентрации углекислоты выше 1,3%. Эти изменения можно объяснить некоторым повышением содержания кислорода во вдыхаемом воздухе в первом случае и увеличением вентиляции легких во втором.

Кроме того, заслуживает внимания то обстоятельство, что в течение длительного пребывания испытателя в гермокамере с биологической регенерацией атмосферы не наблюдалось гипотензивного эффекта, проявляющегося в этих же условиях при небιологических способах регенерации. Этот интересный факт требует дальнейших исследований, так как позволяет предположить возможность того, что биологическая регенерация атмосферы связана не только с воспроизводством кислорода и поглощением углекислоты, но и выполняет иные гигиенически важные функции по облагораживанию атмосферы (Б. А. Адамович и Ю. Г. Нефедов).

Специфический водорослевый запах ощущался лишь в первые минуты после входа в кабину, вскоре к нему наступала полная адаптация.

Таким образом, при непрерывном (до 30 суток) газовом контакте человека с микроводорослями проявлений токсичности не было обнаружено. Этот факт, а также отсутствие токсичности во всех предыдущих, менее продолжительных опытах, как нам кажется, позволяет сделать вывод, что газообразные метаболиты использованного штамма хлореллы и сопутствующей микрофлоры в условиях описываемой экспериментальной системы выраженной токсичностью для человеческого организма не обладают.

В опытах не было обнаружено угнетения культуры, снижения ее продуктивности. Следовательно, газообразные выделения человека не токсичны для избранного вида водорослей.

Таким образом, человек и микроводоросли (исследован термофильный штамм *Chlorella vulgaris*) оказались биологически совместимыми при прямом газообмене, явления антибиоза в исследованные сроки между ними не возникает.

Этот результат позволил перейти к решению второй задачи — исследованию количественных характеристик газообмена системы человек — микроводоросли и попытке управления ими.

Газообмен системы «человек — микроводоросли»

В опытах по замкнутому газообмену системы человек — микроводоросли при обычном смешанном питании испытателя содержание кислорода в системе уменьшается из-за несоответствия количества кислорода, потребляемого человеком и выделяемого микроводорослями, в расчете на единицу выделяемой и потребляемой углекислоты. Это несоответствие возникает вследствие разности дыхательного коэффициента (ДК) испытателя и ассимиляционного коэффициента (АК) микроводорослей.

ДК человека при обычном смешанном питании 0,82—0,85. АК микроводорослей при применяемом нами методе культивирования оказался равным 0,89. Такое соотношение названных коэффициентов приводило к ежесуточному уменьшению количества кислорода в атмосфере кабины на 20 л.

Если баланс по углекислоте достигается соответствующей производительностью культиватора, то для стабилизации системы по кислороду необходимо равенство ассимиляционного и дыхательного коэффициентов.

Общеизвестно, что ДК человека зависит от соотношения в рационе пищевых веществ с различным уровнем восстановленности, и в первую очередь жиров и углеводов — основных источников энергии в организ-

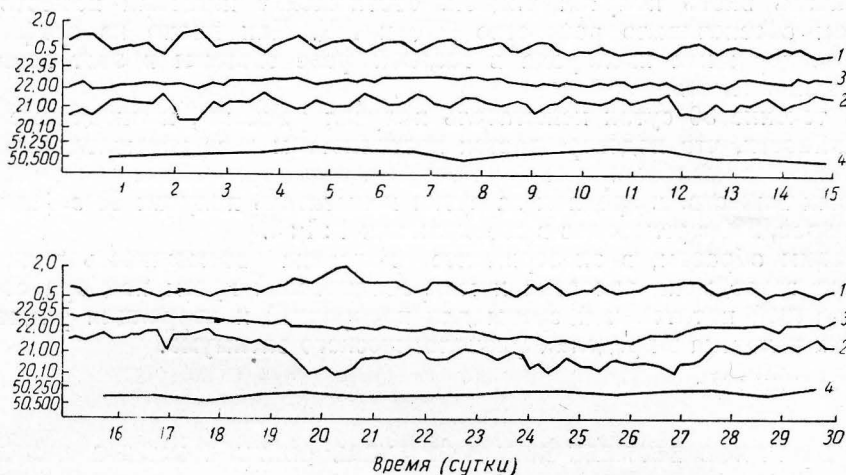


Рис. 2. Динамика изменений концентрации углекислоты и кислорода и веса тела испытуемого в 30-суточном опыте.

1—концентрация углекислоты (в %); 2—абсолютная концентрация кислорода (в %); 3—содержание кислорода (в пересчете на O_2) в газовой фазе системы (в %); 4—вес тела (в кг).

ме. Изменяя эти соотношения в ту или другую сторону, можно увеличить или уменьшить ДК. Мы попытались использовать эту возможность для уравнивания системы по кислороду.

Испытуемый в течение опыта питался специально приготовленными рационами, состав которых позволял менять ДК в пределах 0,83—0,92¹.

Результаты одного из опытов приводятся на рис. 2 в виде графика изменений концентраций углекислоты (кривая 1) кислорода (кривые 2 и 3) и веса испытуемого (кривая 4).

Ход кривой 1 показывает накопление углекислоты днем и уменьшение содержания ее ночью. Это зависит от степени активности испытуемого при равномерной в основном производительности культиватора.

Кривая 2 зеркально следует за кривой 1, она отражает абсолютную концентрацию кислорода, которая зависит от концентрации углекислоты и величины ДК.

Для слежения за изменениями содержания кислорода, обусловленными только колебаниями ДК человека, определялось общее содержание кислорода в газовой фазе системы (в том числе и связанного в углекислоте) в пересчете на кислород. Результаты представлены кривой 3.

Анализ хода этой кривой показывает практическую неизменность общего содержания кислорода в газовой фазе системы до 16-х суток опыта. В это время испытуемый получал рационы питания, соотношение пищевых веществ в которых обуславливало средний ДК, равный АК. На 16-е сутки для проверки эффективности метода коррекции баланса

¹ Рационы изготовлены в лаборатории Всесоюзного научно-исследовательского института консервной промышленности, сотрудникам которого В. П. Ефимову, А. Г. Котович и Н. В. Васильевой пользуемся случаем выразить искреннюю благодарность.

по кислороду испытателю был дан рацион, который должен был снизить ДК. В этом случае ожидалось снижение общего содержания кислорода в газовой фазе систем.

Как видно из рис. 2, оно, действительно, началось на 17-е сутки и продолжалось до 26-х суток опыта. С 24-х суток испытал получил рацион с ДК большим, чем АК микроводорослей. По ходу кривой 3 на рис. 2 видно повышение общего содержания кислорода. С 27-х суток испытал вновь получал рацион, соотношение пищевых веществ в котором обеспечивало равенство ДК и АК. Как видно из графика, общее содержание кислорода в газовой фазе системы в этот период стабилизировалось.

В течение 30 суток испытал получал рационы, полноценные по калорийности, что подтверждается постоянством веса испытал в течение всего опыта (см. рис. 2, 4 кривую), при нормальном содержании пищевых веществ: в среднем за сутки испытал получал 88 г белков, 85 г жиров, 250 г углеводов в соотношении 1 : 1 : 3.

Таким образом, в эксперименте показана возможность полного баланса газообмена человека и микроводорослей путем подбора соответствующей питательной среды для водорослей и коррекции рациона питания человека в пределах физиологического оптимума.

Поступила 27/XII 1966 г.