

5. Гальперин Ю. М., Попова Т. С., Баклыкова Н. М., Короткова Т. В. Методы определения функционального состояния тонкой кишки для установления показаний к энтеральному питанию // Экспериментальное обоснование современных методов хирургического лечения язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки.— М., 1978.— С. 42—47.
6. Гальперин Ю. М., Попова Т. С., Баклыкова Н. М. Разработка методов определения состояния функций тонкой кишки и адекватных смесей для энтерального зондового питания у хирургических больных // Мед. реф. журн.— 1980.— Разд. IV, № 1316.— С. 395.
7. Комаров Б. Д., Гальперин Ю. М., Баклыкова Н. М., Попова Т. С. и др. Физиологические аспекты энтерального зондового питания // Сб. науч. тр. НИИ СП им. Н. В. Склифосовского.— 1976.— 24.— С. 3—16.
8. Уголев А. М. Мембранное пищеварение.— Л.: Наука, 1972.— 358 с.
9. Файтельберг Р. О. Закономерности всасывательной деятельности желудочно-кишечного тракта.

Науч.-исслед. ин-т скорой помощи
им. Н. В. Склифосовского
М-ва здравоохранения РСФСР, Москва

Поступила 25.08.86

УДК 612.55:614.895.3

Оценка теплового состояния организма человека под водой при разной степени защиты от холода

В. А. Козак, В. Н. Ильин, В. А. Крамаренко, В. Я. Фридлянский,
А. П. Бондаренко, Т. Ф. Гриценко

При водолазных погружениях существенное значение имеет нарушение теплового баланса организма человека, связанное с высокой теплопроводностью воды: холодное воздействие водной среды уменьшает время пребывания человека под водой, ухудшает его физическую и умственную работоспособность, нарушает характер и особенности метаболизма, извращает восприятие температуры [3, 4, 9, 10, 16], что может привести к глубокому переохлаждению организма [7, 7, 14], а в ряде случаев к трагическим последствиям [15, 16]. Для предупреждения переохлаждения и создания защитного снаряжения необходимы методы объективной оценки и прогноза теплового состояния организма человека под водой в условиях различной температуры и давления (глубины погружения) [2].

Существующие методы основаны либо на субъективном восприятии человеком тепла, в частности восприятии под водой, которое в таком случае не всегда является адекватным [9], либо на теоретических расчетах математических и физических моделей [13, 16], в которых, несмотря на их сложность, невозможно учесть многообразие факторов окружающей среды и индивидуальные особенности организма человека. Прямые методы оценки теплового состояния организма человека под водой основаны на измерении поверхностной кожной и внутренней, в частности ректальной, температур тела человека, а также измерении его тепловых потерь [3, 5]. Однако данных об изменении температуры тела водолаза под водой при разной теплозащите в литературе недостаточно.

В данной работе ставились следующие задачи: 1-я — определить изменения температуры кожи в различных участках тела человека под водой при разной теплозащите, а также связь этих изменений температуры со «средневзвешенной» температурой (СВТ) кожи; 2-я — на основании полученных результатов найти метод быстрой и относительно простой оценки теплового состояния организма человека под водой.

Методика

Исследования проводили в натуральных условиях. Водолазы (7 человек) в гидрокостюмах (ГК) «мокрого типа» и различной меры теплозащиты в состоянии покоя погружались в море на глубину до 15 м при температуре воды +20 °С. Использовали следующие

щие четыре вида гидрокостюмов (ГК): 1-й — «утолщенный» (толщина неопренового слоя — 6 мм), применяемый для подводной охоты; 2-й — модель № 2 или иначе — М-2 (толщина неопренового слоя — 4 мм), применяемая для подводного плавания; 3-й — «удлиненный» (толщина неопренового слоя — 3 мм), применяемый для скоростного плавания и подводного ориентирования; 4-й — «укороченный» (толщина неопренового слоя — 3 мм; состоит из жилета с короткими рукавами и шорт), применяемый для скоростного плавания.

Принимая во внимание неравномерность температурных характеристик отдельных участков тела, оценку теплового состояния организма проводили с помощью регистрации температуры кожи водолаза в пяти точках, расположенных в области лба, груди, кисти, голени, бедра. В качестве интегрального показателя служила «средневзвешенная температура» кожи ($\bar{T}$), которая, согласно литературным данным [8, 11], наиболее адекватно отражает тепловое состояние человека в данных условиях. «Средневзвешенную» температуру кожи рассчитывали по Витте [1]:

$$\bar{T} = 0,07\bar{T}_{\text{лба}} + 0,5\bar{T}_{\text{груди}} + 0,5\bar{T}_{\text{кисти}} + 0,18\bar{T}_{\text{бедра}} + 0,2\bar{T}_{\text{голен}}. \quad (1)$$

Температуру кожи регистрировали с помощью разработанного в лаборатории подводной физиологии специального электротермометра и комплекта датчиков к нему.

Электротермометр представляет собой шестиканальное электронное устройство с пределом измерения температуры 10—40 °С. В качестве термочувствительных датчиков использовали подобранные по одинаковым параметрам терморезисторы КМТ-4, герметизированные пластмассой. Точность измерения температуры составляла $\pm 0,1$ °С. Пять датчиков служили для измерения температуры в области лба, груди, кисти, голени и бедра. Шестой датчик служил для измерения температуры воды, окружаю-

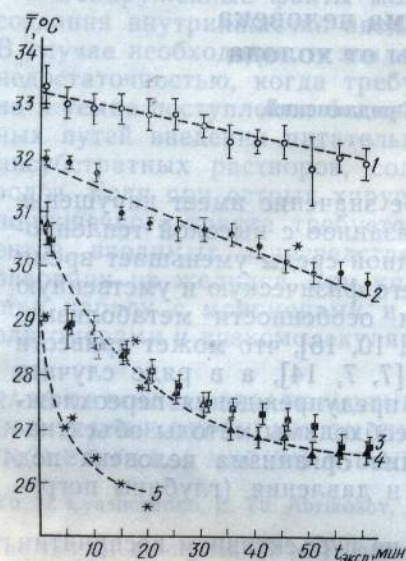


Рис. 1. Изменение «средневзвешенной» температуры ($\bar{T}$) кожи водолазов при их погружении в воду:

1 — в гидрокостюме (ГК) «утолщенного» вида; 2 — в ГК вида модели № 2 (М-2); 3 — в ГК «удлиненного» вида; 4 — в ГК «укороченного» вида; 5 — без ГК. Звездочкой отмечено достоверное снижение температуры ($P \leq 0,05$).

щей водолаза, и крепился на гидрокостюме. Для контроля работы аппаратуры температуру воды измеряли также ртутным термометром. Измерение температуры начинали после погружения водолаза на заданную глубину. Температуру кожи в указанных точках замеряли через 5-минутный интервал в течение всего времени погружения.

Полученные результаты обрабатывали с помощью статистического, регрессионного и корреляционного методов анализа.

Результаты и их обсуждение

При хорошей теплоизоляции, которую обеспечивали ГК для подводной охоты и ГК для подводного плавания (М-2), наблюдалось медленное уменьшение температуры тела водолаза, не выходящее за пределы оптимальных значений. Начальная «средневзвешенная» температура кожи водолаза в ГК для подводной охоты составляла $33,0 \pm 1,3$ °С. В конце одночасового периода погружения при температуре воды $+20$ °С «средневзвешенная» температура составляла $31,9 \pm 1,0$ °С. Снижение температуры составило $1,4$ °С и не было статистически достоверным (рис. 1, а). Это снижение СВТ ($\bar{T}$) хорошо аппроксимируется (методом наименьших квадратов) линейным уравнением (табл.1)

$$\bar{T} = 33,2 - 0,02t, \quad (2)$$

где t — время экспозиции, выраженное в минутах. Падение СВТ кожи водолаза, одетого в ГК для подводного плавания (М-2), было более выражено (см. рис. 1, б), когда начальная СВТ кожи водолаза составляла $32,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а в конце одночасового пребывания на дне при температуре воды $+20^{\circ}\text{C}$ уменьшалась до $29,7^{\circ}\text{C} \pm 0,8^{\circ}\text{C}$. Снижение СВТ составило $2,4^{\circ}\text{C}$. Статистически достоверное уменьшение температуры кожи наблюдалось к концу 45-й минуты пребывания водолаза под водой. Это снижение СВТ хорошо аппроксимируется линейным уравнением (см. табл. 1)

$$\bar{T} = 31,9 - 0,04t. \quad (3)$$

Следует отметить, что находясь в ГК для подводной охоты или в ГК для подводного плавания (М-2), водолазы не испытывали ощущение теплового «дискомфорта» в течение всего периода пребывания под водой, так как СВТ кожи находилась в области теплового «комфорта» и не опускалась ниже допустимой температуры (29°C) [3]. В этом оптимальном для организма диапазоне температур не происходит существенных изменений в системе терморегуляции организма, коэффициенты теплопроводности кожи и теплопродукции остаются на постоянном уровне [3, 16]. Следовательно, с определенной мерой приближения можно предположить, что остывание тела водолаза в данных условиях определяется пассивным физическим процессом. В этом случае спад температуры нагретого тела в среде с бесконечной теплоемкостью (водная среда) описывается формулой [6]

$$\bar{T} = \bar{T}_R \cdot e^{-\frac{k}{C}t} + \bar{T}_W (1 - e^{-\frac{k}{C}t}), \quad (4)$$

где $\bar{T}_R$ — начальная температура тела водолаза ($^{\circ}\text{C}$), $\bar{T}_W$ — температура воды ($^{\circ}\text{C}$), C — теплоемкость остывающего тела (Дж/К), k — коэффициент теплопроводности ($\text{Дж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).

Таблица 1. Экспериментальные и рассчитанные по уравнению регрессии значения «средневзвешенной» температуры кожи при погружении водолазов в гидрокостюмах (ГК) различного вида, $^{\circ}\text{C}$

Время пребывания в воде, мин	Значения температуры						
	экспериментальные				рассчитанные		
	1-й вид ГК	2-й вид ГК	3-й вид ГК	4-й вид ГК	1-й вид ГК	2-й вид ГК	3-й и 4-й виды ГК
0	33,3	32,0	30,8	30,5	33,2	31,9	30,8
5	33,0	31,9	28,9	28,9	33,1	31,7	29,8
10	32,9	31,7	28,8	28,5	33,0	31,5	29,0
15	32,9	31,0	28,4	28,4	32,9	31,3	28,4
20	32,8	30,8	27,9	28,1	32,8	31,1	27,9
25	32,8	30,7	27,7	27,8	32,7	30,9	27,6
30	32,6	30,7	27,5	27,5	32,6	30,7	27,3
35	32,3	30,6	27,1	27,4	32,5	30,5	27,1
40	32,3	30,4	26,9	27,3	32,4	30,3	26,9
45	32,3	30,1	26,9	27,2	32,3	30,1	26,8
50	31,8	29,9	26,6	27,1	32,2	29,9	26,7
55	32,0	29,9	26,6	26,7	32,1	29,7	26,6
60	31,9	29,7	26,6	26,7	32,0	29,5	26,6

При использовании гидрокостюмов для подводной охоты и для подводного плавания (М-2), обладающих хорошими теплоизолирующими свойствами, коэффициент теплопроводности мал ($k \rightarrow 0$). Используя разложение в ряд Тейлора и элементарное преобразование, уравнение (4) можно переписать в следующем виде:

$$\bar{T} = \bar{T}_R - (\bar{T}_R - \bar{T}_W) \cdot \frac{k}{C} \cdot t. \quad (5)$$

В результате получаем линейное уравнение, которое соответствует эмпирическим регрессионным уравнениям (2) и (3) и описывает снижение температуры тела при достаточно хорошей теплоизоляции.

При использовании гидрокостюмов для скоростного плавания («удлиненного» и «укороченного» вида) с более плохими, чем у первой группы гидрокостюмов, теплозащитными свойствами наблюдается более быстрое падение СВТ кожи водолазов под водой. Следует отметить, что снижение температуры кожи происходит по закону, отличающемуся от линейного (см. рис: 1, 1; 2, 4). Начальная «средневзвешенная температура» кожи водолаза в ГК «удлиненного» вида составляла

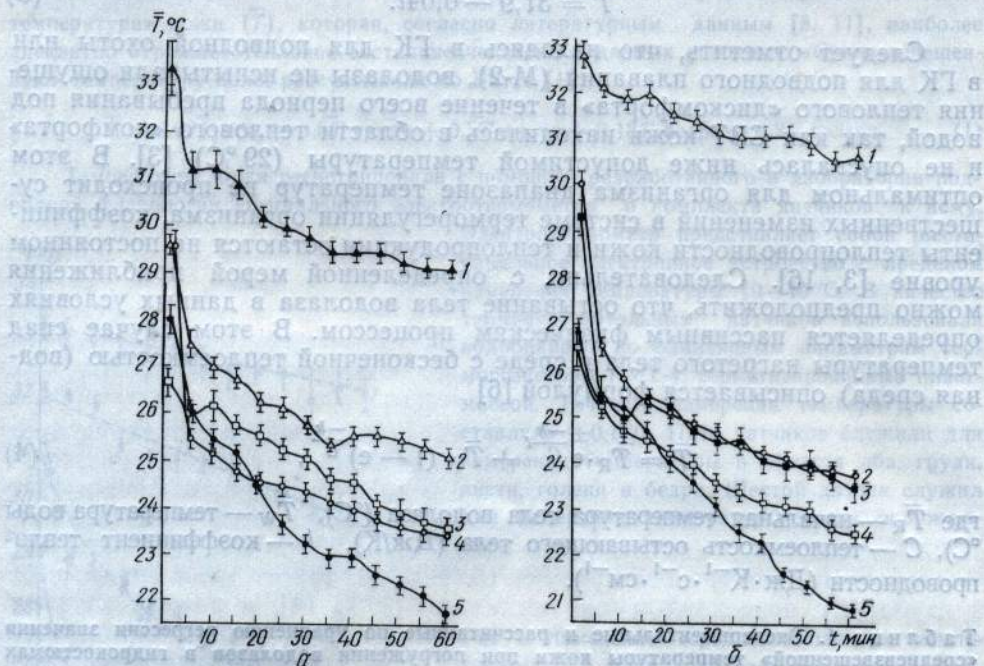


Рис. 2. Изменение температуры кожи в различных участках тела водолазов в гидрокостюме «укороченного» (а) и «удлиненного» (б) видов:

1 — лоб; 2 — грудь; 3 — кисть; 4 — бедро; 5 — голень. Звездочкой отмечено достоверное снижение ($P \leq 0,05$).

30,8 °С, а в ГК «укороченного» вида — 30,5 °С, что выше допустимых значений температуры, которые, согласно данным, полученным другими авторами [3], не должны быть ниже 29—30 °С.

СВТ кожи водолазов, одетых в гидрокостюм «удлиненного» вида, статистически достоверно ($P \leq 0,05$) снижается после 20-минутного пребывания под водой. В случае использования ГК «укороченного» вида СВТ кожи статистически достоверно ($P \leq 0,05$) снижается после 15-минутного пребывания на дне. За этот промежуток времени СВТ быстро падает ниже допустимого значения (29 °С) и в дальнейшем продолжает снижаться, хотя и с меньшей скоростью. Интервал времени 15—20 мин соответствует приблизительно тому интервалу времени пребывания водолаза под водой в данных условиях, после которого у него возникало ощущение теплового «дискомфорта».

Снижение СВТ кожи водолазов, одетых в ГК «удлиненного» или «укороченного» вида, описывается одним асимптотическим уравнением экспоненциального вида (см. табл. 1).

$$\bar{T} = 30,8 \cdot e^{0,04t} + 26,5 \cdot (1 - e^{-0,038t}). \quad (6)$$

То, что снижение температуры происходит по такому сложному закону, свидетельствует о том, что при плохой теплозащите в организме водолаза включаются компенсаторные процессы, проявляющиеся в сужении поверхностных кровеносных сосудов и, следовательно, в уменьшении

коэффициента теплопроводности кожи, а также в повышении в организме уровня теплопродукции. В результате этих компенсаторных процессов скорость снижения температуры кожи у водолазов под водой уменьшается.

Обнаруженный в результате наших исследований факт подобия динамики снижения СВТ кожи водолазов как в случае использования гидрокостюма «удлиненного» вида, так и в случае использования гидрокостюма «укороченного» вида (см. рис. 1, 3, 4), не противоречит результатам, полученным другими авторами [12], согласно которым отсутствие теплоизоляции конечностей мало влияет на скорость снижения кожной температуры человека, однако существенно снижает допустимое время нахождения человека в холодной воде. Объяснение этого факта заключается, возможно, в том, что напряженность терморегуляторных реакций организма на воздействие холодом возрастает (ограничение теплоотдачи и усиление метаболических процессов без теплоизоляции конечностей), компенсируя на некоторое время повышенную теплоотдачу. В этом случае энергетические ресурсы организма истощаются скорее.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между «средневзвешенной» температурой кожи и температурой в различных участках кожи водолазов под водой в первые 15 мин их погружения в гидрокостюмах (ГК) разного вида

Вид ГК	Участки кожи				
	лоб	грудь	кисть	бедро	голень
1-й	0,682	0,881	-0,245	0,966	-0,987
2-й	0,835	0,944	0,794	0,972	0,978
3-й	0,996	0,966	0,972	0,991	0,952
4-й	0,978	0,990	0,982	0,998	0,987

Анализируя изменения температуры в отдельных точках кожи человека при использовании гидрокостюмов этих двух видов (рис. 2, а; б), убеждаемся, что в случае ГК «укороченного» вида температура кожи на открытых неизолированных участках ног — бедро и голень (см. рис. 2, а) — в первые 5—15 мин снижалась быстрее и больше, чем температура кожи соответствующих участков изолированных ног при использовании ГК «удлиненного» вида (см. рис. 2, б). Например, за первые 2 мин температура голени у водолаза, одетого в ГК «укороченного» вида, снизилась на 2,3 °C ($P \leq 0,05$), в то время как у водолаза, одетого в ГК «удлиненного» вида, за то же время температура голени снизилась всего на 0,9 °C. Однако это снижение не было статистически достоверным. Статистически достоверное снижение температуры кожи (на 1,9 °C; $P \leq 0,05$) в данной точке наблюдалось лишь к концу 40-й минуты пребывания водолаза в гидрокостюме «удлиненного» вида под водой. Температура кожи бедра также быстро падала. К концу 10-й минуты пребывания водолаза в гидрокостюме «укороченного» вида под водой температура кожи бедра снизилась на 4,7 °C ($P \leq 0,01$), а в гидрокостюме «удлиненного» вида — только на 2,4 °C ($P \leq 0,05$). После 10-й минуты пребывания водолазов под водой в гидрокостюмах «удлиненного» или «укороченного» видов падение температуры кожи во всех точках резко замедлилось, по-видимому, за счет возрастания напряженности терморегуляционных процессов в организме (см. рис. 2).

Для выяснения связи температуры в отдельных участках кожи водолаза со «средневзвешенной» температурой кожи в первые минуты погружения, в течение которых наблюдаются наиболее значительные изменения температуры, были рассчитаны коэффициенты корреляции между ними за первые 15 мин при применении гидрокостюмов каждого вида в отдельности, а также средние коэффициенты корреляции (табл. 2). Самые высокие средние коэффициенты корреляции отмечали между

температурой бедра и «средневзвешенной» температурой кожи, а также между температурой, измеренной на коже груди, и «средневзвешенной» температурой кожи. Интересно отметить, что по мере снижения теплозащиты организма водолазов проявляется тенденция к увеличению коэффициентов корреляции между температурой в различных участках тела и «средневзвешенной» температурой (см. табл. 2).

Выводы

Различия значений «средневзвешенной» температуры и характера их изменений при неодинаковой теплозащите водолазов позволили сформулировать ряд критериев оценки тепловой защиты организма человека, на основании которых можно прогнозировать длительность пребывания человека под водой без риска переохлаждения.

1. Начальная СВТ кожи водолаза должна находиться в пределах оптимальных ($31-32^{\circ}\text{C}$) или допустимых ($29-30^{\circ}\text{C}$) значений температур.

2. Скорость снижения СВТ кожи водолаза во время погружения (особенно в начальной его фазе) не должна превышать некоторого критического значения. Это значение вычисляется на основании того, что теплоизоляция организма может считаться оптимальной, если в течение заданного периода пребывания человека под водой его СВТ кожи не снизилась ниже допустимого значения (29°C). Для нашего конкретного случая при температуре воды $+20^{\circ}\text{C}$ и глубине погружения до 15 м расчеты на основании уравнений регрессии свидетельствуют о том, что в течение 1 ч теплоизолирующие свойства гидрокостюмов для подводной охоты и для подводного плавания (М-2) могут считаться оптимальными, тогда как теплоизолирующие свойства гидрокостюмов для скоростного плавания и подводного ориентирования («удлинённый» и «укороченный» виды ГК) не являются оптимальными, так как при этом в конце 60-й минуты нахождения на грунте значение «средневзвешенной» температуры снижалось до $26,6^{\circ}\text{C}$.

3. Если изменение СВТ происходит по линейному закону (рис. 1, а, б), это свидетельствует о хорошей теплозащите организма человека. Снижение СВТ кожи по отличающемуся от линейного более сложному, например, экспоненциальному закону (рис. 1, 3—5), отражает недостаточную теплозащиту организма человека.

Предложенные нами три критерия позволяют провести объективную оценку и прогнозирование теплового состояния организма при разной теплозащите относительно быстрым и доступным методом. Этот метод можно упростить, так как, согласно результатам проведенного нами корреляционного анализа, тепловую защиту организма человека под водой можно оценить, измерив температуру кожи в одной из точек (бедра или грудь) в течение первых 10—20 мин погружения.

ESTIMATION OF THERMAL STATE OF HUMAN ORGANISM UNDER WATER WITH DIFFERENT DEGREE OF COLD PROTECTION

V. A. Kozak, V. N. Ilyin, V. A. Kramarenko, V. Ya. Fridlyansky, A. P. Bondarenko, T. F. Gritsenko

Changes of skin temperature in different parts of human body are described as well as dependence of values of this temperature on «average-suspended» skin temperature serving as an integral index of thermal state of human organism during immersions in the open sea in protective waterproof suits of «wet» type with different thermal protection. Criteria are suggested which permit estimating and predicting thermal state of human organism under water.

A. A. Bogomolets Institute of Physiology,
Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kiev

1. Витте Н. К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение.— Киев : Госмедиздат УССР, 1956.— 148 с.
2. Козак В. А., Ильин В. Н., Фридлянский В. Я. и др. К вопросу об оценке теплового состояния организма человека под водой в гидрокостюмах «мокрого» типа // Прогнозирование в прикладной физиологии.— Фрунзе, 1984.— Т. 1.— С. 139—141.
3. Коцеев В. С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода.— М.: Медицина, 1981.— 288 с.
4. Куренков Г. И. Физиология труда под водой в условиях гипербарии // Руководство по физиологии труда.— М.: Медицина, 1983.— С. 365—397.
5. Слепчук Н. А. Оценка теплового состояния организма человека при различных температурных условиях // Физиол. журн. СССР, 1984.— № 6.— С. 330—332.
6. Телеснин Р. В. Молекулярная физика.— М.: Высш. школа, 1973.— 360 с.
7. Boutellier Ch., Colin J., Timbal J. Tolerance aux immersion en froide // Rev. med. aeronaut. et spat.— 1973.— 12, N 45.— P. 163—167.
8. Colin J., Timbal J., Boutellier Ch., Houdas Y. Reactions physiologiques et tolerance de l'homme immerge en can froide // Rev. Corp. Sante Arm.— 1967.— 6, N 5.— P. 591—612.
9. Garrard M. P., Hayes P. A., Carlyle R. E., Stock M. J. Metabolic and thermal status of divers during simulated dives to 55 Bars // Underwater Physiology VII, Proc. 7th symp. on underwater physiology.— Bethesda, Maryland, 1981.— P. 345—355.
10. Hoar P., Raymond L., Langworthy H. L. et al. Physiological responses of men working in 25.5 °C water, breathing air or helium trimix // J. Appl. Physiol.— 1976.— 40, N 4.— P. 605—610.
11. Kuch L. A., Zumrick J. Thermal measurements on divers in hyperbaric helium-oxygen environments // Undersea Biomed. Res.— 1978.— 5, N 3.— P. 213—231.
12. Marcus B. P., Richards S. Effect of clothing insulation beneath on immersion coverall on the rate of body cooling in cold water // Aviat. Space and Environ. med.— 1978.— 49, N 3.— P. 480—482.
13. Montgomery L. D. Biothermal simulation of scuba divers // Aviat. Space and Environ. Med.— 1975.— 46, N 6.— P. 814—818.
14. Padbury E. H., Hayes P. A. The differing responses to mild sustained cooling and severe transient cold water exposure // Annual congress of european undersea biomedical society, 8, 1982.— P. 332—351.
15. Pasche A., Tonjum S., Holland B. Diver heating during cold water dives at 51 ATA // Undersea Biomed. Res.— 1982.— 9, N 1.— 14 (suppl.).
16. Webb P. Cold exposure // The physiology and medicine of diving and compressed air work.— London, 1975.— P. 285—306.

Ин-т физиологии им. А. А. Богомольца
АН УССР, Киев

Поступила 28.10.86