
Радіоелектроніка біомедичних технологій

УДК 004.942:001.57+519.7+612.5

КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХОЛОДОВОГО СТРЕССА В ВОДЕ¹

*Ермакова И. И.¹, д.б.н., проф.; Иванушкина Н. Г.², к.т.н., доцент;
Николаенко А. Ю.¹; Солончук Ю. Н.¹*

¹ *Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев, Украина*

² *Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», Киев, Украина
julia.solorchuk@gmail.com*

COMPLEX OF COMPUTER MODELS FOR COLD STRESS EVALUATION IN WATER

I. Yermakova¹, N. Ivanushkina², A. Nikolaienko¹, Yu. Solopchuk¹

¹ *International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences (NAS) and Ministry of Education and Science (MES) of Ukraine, Kyiv, Ukraine,*

² *National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Введение

Пребывание человека в холодной воде относится к экстремальным воздействиям, связанным с риском для здоровья и жизни человека. Это объясняется высокой теплопроводностью воды, коэффициент которой в 25 раз выше теплопроводности воздуха и равен 0,56 Вт/(м·К). В холодной воде температура тела снижается независимо от того, находится человек в состоянии покоя или же выполняет физическую нагрузку. Угроза гипотермии наступает при длительном пребывании человека в воде ниже 25 °С [1].

Для оценки времени выживания в воде чаще всего используется кривая Молнара [2], а также другие диаграммы и таблицы, построенные по статистическим данным [3]. С развитием информационных технологий появилось альтернативное направление – разработка и применение компьютерных моделей терморегуляции для прогноза функционального состояния человека в воде и анализа возможных факторов риска.

Преимущество моделей в возможности получить предварительный прогноз физиологических изменений не подвергая риску здоровье человека. Началом этого направления стала модель *Montgomery* [4], где процессы терморегуляции были представлены упрощенно, но, тем не менее, давали возможность оценить время выживания человека в воде. Это

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1005>

направление успешно развивается по пути детализации процессов терморегуляции человека и методов разработки информационных технологий [5-7].

Цель статьи — разработка комплекса компьютерных моделей для прогноза скорости охлаждения человека в воде.

Метод

Комплекс математических моделей для оценки холодового стресса человека в воде построен на базе мультикомпарментальных моделей терморегуляции и теплообмена человека, включённых в информационную платформу [8].

При построении комплекса моделей геометрическая форма тела человека была аппроксимирована набором из 39 компарментов [9]. Туловище, плечи, предплечья, кисти, бедра, голени и стопы представлены в виде многослойных цилиндров, а голова в виде двухслойной сферы. Слой цилиндра или сферы – это компармент, который соответствует определенному органу или ткани организма. Кровь представлена отдельным компарментом, который соответствует резервуару смешивания тепловых потоков, доставляемых кровью, в крупных венозных сосудах и сердце. В модели принято допущение, что температура крови, притекающей ко всем компарментам, одинакова и равна температуре смешанной венозной крови. Конвективный теплообмен между близлежащими поверхностными венами и глубинными артериями не учитывается, так как модель представляет собой систему с сосредоточенными параметрами.

В комплексе моделей система терморегуляции человека разделена на две части: активную и пассивную. Пассивная часть системы терморегуляции описывает процессы образования тепла, теплопередачи внутри организма и теплообмена с окружающей средой [10, 11]. Активная часть системы терморегуляции представлена терморегулирующими реакциями — сосудистая реакция кожи и холодовой термогенез [12]. Температурный гомеостаз обеспечивается регуляцией по обратным связям. Сигналы обратной связи поступают в центр терморегуляции от рецепторов, расположенных в мозге и коже человека.

Внутри организма теплопередача происходит за счет кондукции между тканями и органами и теплопереноса кровью. Теплообмен с водой происходит за счет конвекции, вынужденной или свободной. На воздухе теплообменные процессы осуществляются путем конвекции, инфракрасного излучения и испарения с поверхности тела и верхних дыхательных путей.

Основное звено в архитектуре комплекса математических моделей для оценки холодового стресса — модель образования дополнительного тепла за счет холодового термогенеза в скелетных мышцах тела. Дрожь

увеличивает теплопродукцию выше уровня базового обмена веществ в зависимости от интегрального холодого сигнала от рецепторов мозга и кожи.

В используемой модели дополнительное тепло, вырабатываемое за счет холодого термогенеза в скелетных мышцах тела, определяется по формуле:

$$\Delta M_{sh} = A \left((T_s^* - T_s) (T_{br}^* - T_{br}) + 3 (T_s^* - T_s) \right) + A \left(3 (T_{br}^* - T_{br}) + 65 \left(\frac{T_s^* - T_s}{\%BF} \right)^{1,5} \right) \quad (1)$$

где M_{sh} — холодого термогенез, ккал/ч; A — площадь поверхности тела, m^2 ; $\%BF$ — процентное содержание жира в теле, %; T — температура, $^{\circ}C$; индексы: * — начальное значение; br — мозг; s — кожа.

Дополнительное тепло, образованное в результате быстрого непроизвольного сокращения мышечных волокон, распределяется по всем скелетным мышцам тела согласно формуле:

$$\Delta M_{shi} = k_{mi} \cdot \Delta M_{sh} \quad (2)$$

где k — коэффициент распределения дополнительного тепла за счет холодого термогенеза; индексы: m — мышцы; i — номер компартмента. В предлагаемой модели 86% образующегося тепла вырабатывается в мышцах туловища, 6% — в мышцах рук и 8% — в мышцах ног.

Одновременно с увеличением теплопродукции происходит увеличение кровотока в скелетных мышцах тела:

$$\Delta W_{mi} = k_{mi} \cdot W_{mi}^* \cdot \frac{\Delta M_{sh}}{M^*} \quad (3)$$

где W_{mi}^* — базовый кровоток мышц i -го компартмента, л/ч; M^* — скорость основного обмена веществ, ккал/ч.

Комплекс математических моделей для прогноза функционального состояния человека в воде реализован в виде компьютерной программы. Графический интерфейс пользователя позволяет легко работать с комплексом математических моделей, задавая входные условия моделируемой ситуации. В соответствии с целями модельных экспериментов задаются температура воды, нагрузка, длительность пребывания в воде и степень погружения человека в воду. Результаты компьютерного моделирования в виде графиков и таблиц предоставляют информацию о функциональном состоянии человека, времени безопасного пребывания в холодной воде и возможных риск-факторах.

Результаты компьютерного моделирования и обсуждение

Для оценки холодового стресса при внезапном попадании человека в воду проведены модельные эксперименты в следующих условиях. Диапазон температур воды от 5 до 25 °С. Положение человека в воде (рис. 1): 1 — полное погружение, 2 — голова на воздухе, 3 — голова и руки на воздухе.

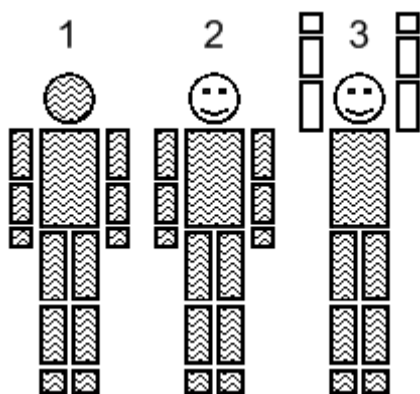


Рис. 1. Статус человека в воде:
1 – полное погружение,
2 – голова на воздухе,
3 – голова и руки на воздухе

Температура воздуха и воды была одинаковой. Характеристики человека: мужчина, 25 лет, вес 70 кг, рост 170 см, относительное количество жира составляет 15% от массы тела, площадь поверхности тела 1,8 м², интенсивность физической нагрузки — 120 ккал/ч, длительность погружения — 1 час.

При погружении человека в воду возникает сосудистая терморегуляторная реакция — сужение кровеносных сосудов в коже. Кожный кровоток моментально снижается до своего минимального значения 1 л/ч при всех температурах воды в исследуемом диапазоне, что позволяет уменьшить отвод тепла от ядра к поверхности тела. Температура кожи экспоненциально падает, за несколько минут ее значение становится всего лишь на 1–2 °С выше температуры воды.

Результаты моделирования показали, что скорость охлаждения существенно зависит от температуры воды и степени погружения. На рис. 2 показано семейство статических характеристик теплотерь за счет

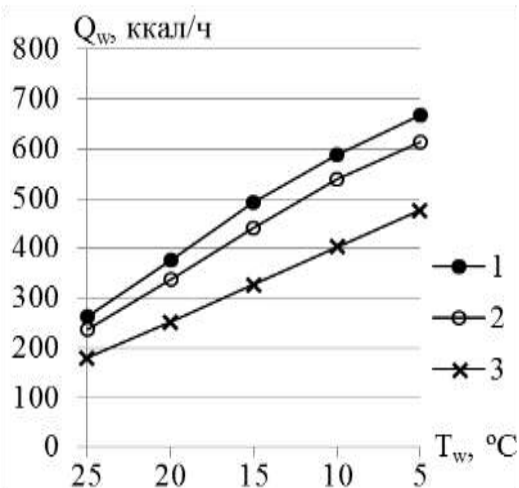


Рис. 2. Конвективные потери тепла (Q_w) в воде различной температуры (T_w) к часу для трех статусов погружения

водной конвекции к концу исследования в зависимости от положения человека в воде при температурах от 5 до 25 °С. Как видно из графика, уменьшение находящейся в воде площади поверхности тела человека снижает отвод тепла конвекцией от организма в воду. Если голова на воздухе, водная конвекция на 8–11% ниже, чем при полном погружении. В случае, когда голова и руки на воздухе, водная конвекция на 29–33% ниже, чем при полном погружении. Даже во время пребывания в, казалось бы, не очень холодной воде 25 °С человек испытывает холодовой стресс.

С целью сохранения теплового баланса возникает основная терморегуляторная реакция организма на холод – образование дополнительного тепла путем непроизвольного сокращения скелетных мышц, так называемый холодовой термезис или холодовая дрожь.

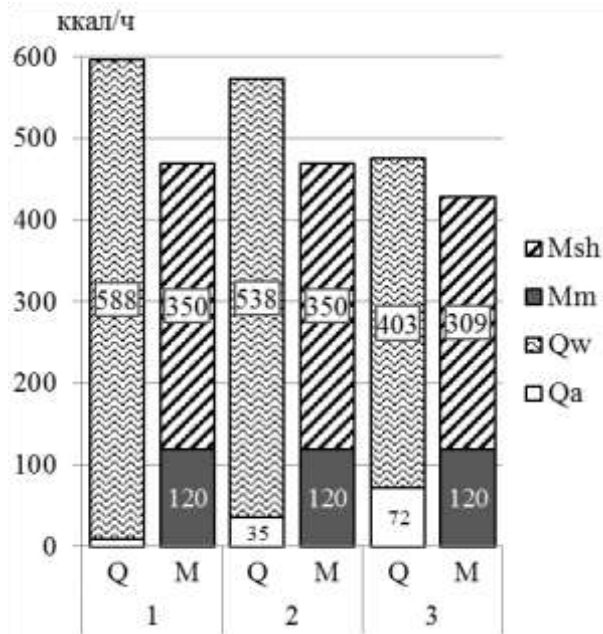


Рис. 3. Суммарные теплотери (Q) и суммарная теплопродукция (M) человека к часу для трех статусов погружения в воду при температуре 10 °С

и теплопродукцией (M_m — нагрузка, M_{sh} — холодовая дрожь) к концу исследования для трех положений человека в воде при температуре 10 °С. Если голова находится на воздухе, а остальное тело в воде, то общие теплотери на 4% ниже, чем когда все тело находится в воде. Если на воздухе находятся еще и руки, то общие теплотери снижаются на 20% по сравнению с полным погружением.

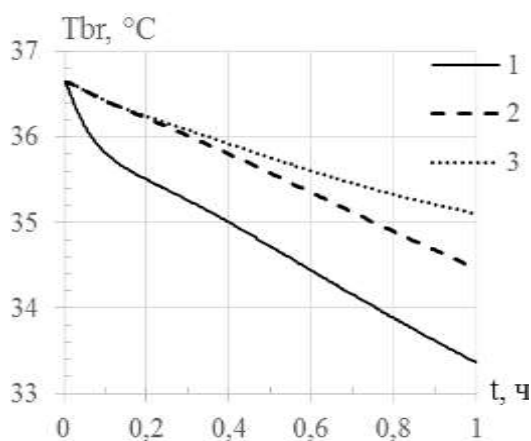


Рис. 4. Динамика температуры мозга (T_{br}) при температуре воды 10 °С для трех статусов погружения

Интенсивность дрожи возрастает с уменьшением температур кожи и мозга. Согласно данным литературы, максимальный термогенез находится в пределах 4-5-кратного увеличения основного обмена [13].

В холодной воде, независимо от уровня погружения, теплотери всегда выше теплообразования. Поэтому снижение температуры ядра тела наблюдается для всех исследуемых температур воды и уровней погружения. На рис. 3 показана разница между отводом тепла от организма в среду (Q_w — в воде, Q_a — на

При длительном пребывании человека в холодной воде все время присутствует угроза гипотермии. Гипотермия оценивается по температуре мозга. На рис. 4 представлена динамика температуры мозга человека во время пребывания в воде при температуре 10 °С. Графики выразительно

демонструють різницю між ситуаціями, коли людина знаходиться в воді з головою і коли голова знаходиться на повітрі. При повному зануренні температура мозку всього за 4 хвилини падає до 36°C . Уже через 25 хвилин при повному зануренні настає гіпотермія (температура мозку опускається нижче 35°C) і подальше перебування в воді небезпечно для здоров'я людини. За годину температура мозку падає до $33,4^{\circ}\text{C}$. Якщо голова знаходиться на повітрі, а решта тіла в воді при температурі 10°C , то час безпечної перебування збільшується вдвічі – 49 хвилин, хоча тепловтрати всього на 4% нижче, ніж при повному зануренні. Якщо на повітрі знаходяться ще й руки, то швидкість охолодження мозку в півтора рази нижче, ніж коли на повітрі знаходиться тільки голова, температура мозку знижується до $35,1^{\circ}\text{C}$ кінця дослідження і людині не загрожує гіпотермія.

На рис. 5 показано температура мозку через годину перебування в воді в залежності від температури води і рівня занурення.

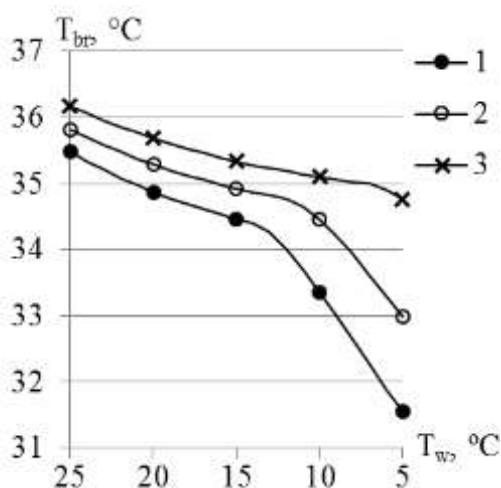


Рис. 5. Температура мозку (T_{br}) в воді різної температури (T_w) к годині для трьох статусів занурення

залежності від температури води і рівня занурення. Перебування в воді вище 20°C впродовж години безпечно для людини незалежно від статусу занурення. Повне занурення в воду при температурі $15-20^{\circ}\text{C}$ к годині призводить до легкої гіпотермії, але небезпеки можна уникнути, якщо голова знаходиться на повітрі. Впродовж перебування в воді при температурі нижче 15°C холодова дрожь досягає максимально можливого значення — 350 ккал/ч, і теплоутворення стають набагато менше тепловтрат, що кінця дослідження призводить до гіпотермії, навіть якщо голова знаходиться на повітрі. Найбільш безпечно для здоров'я людини виявилось перебування в воді, коли голова і руки знаходились на повітрі. Лише при температурі води 5°C к годині температура мозку знизилась до $34,7^{\circ}\text{C}$, що свідчить про легкої гіпотермії.

Висновки

Розроблено комплекс комп'ютерних моделей для прогнозу динаміки теплофізіологічного стану людини в залежності від положення тіла в воді різної температури. Комплекс комп'ютерних моделей дозволив оцінити холодовий стрес, розрахувати час безпечної перебування і виявити можливі фактори ризику при повному і частковому перебуванні людини в холодній воді.

Результати моделювання показали, що швидкість охолодження

существенно зависит от температуры воды и степени погружения. При температуре воды ниже 25 °С теплотери всегда выше теплообразования, поэтому снижение температуры ядра тела наблюдается для всех уровней погружения. Наиболее безопасно для здоровья оказалось пребывание человека в воде, когда голова и руки находятся на воздухе.

Перечень источников

1. Marino F. Whole body cooling by immersion in water at moderate temperatures / F. Marino, J. J. Booth // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 1998. – No.1. – P. 73-81.
2. Molnar G. W. Survival of hypothermia by men immersed in the ocean / G. W. Molnar // *The journal of the american medical association*. – 1946. – Vol. 131, No. 13. – P. 1046-1050.
3. Golden F. Essentials of Sea Survival / F. Golden, M. Tipton. - Human Kinetics, - 2002. – 320 p.
4. Montgomery L. D. A model of heat transfer in immersed man / L. D. Montgomery // *Annals of Biomedical Engineering*. – 1974. – Vol. 2, No.1. – P. 19–46.
5. Wissler E. H. A Mathematical Model of the Human Thermal System / E. H. Wissler // *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. – 1964. - No.26. – P. 147–166.
6. Tikuisis P. Prediction of sea survival time / P. Tikuisis, A. A. Keefe // *Defence and Civil Institute of Environmental Medicine DCIEM*. – 1996. – Vol. 96, No.12. – P. 12-32.
7. Xu X. Survival Time Prediction in Marine Environments / X. Xu, C. A. Turner, W. R. Santee // *Journal of Thermal Biology*. - 2011. – Vol. 36, No.6. – P. 340–45.
8. Ермакова И.И. Информационная платформа мультикомпаратментальных моделей терморегуляции человека / И. И. Ермакова // *Кибернетика и вычислительная техника*. - 2013. - 174. - С. 81-91
9. Ермакова И.И. Компьютерная модель терморегуляции человека при погружении в воду / И.И. Ермакова, Ю.Н. Солопчук // *Кибернетика и вычислительная техника*. – Вып. 172. – Киев. – 2013. – С. 39-48.
10. Yermakova I.I. Heat exchange model for prediction of human thermal state in water / I.I. Yermakova, Y.M. Solopchuk, J.P. Tadeeva // *Electronics and Nanotechnology: наук.праці XXXII міжн.конф. ; 10-12 квітня 2012р., Київ*. - 2012. - С.200.
11. Yermakova I., Heat production, heat transfer and heat exchange in man during water immersion / I. Yermakova, Y. Solopchuk, L. Khudyakova // *Electronics and Nanotechnology: наук.праці IEEE XXXIII міжн.конф. ; 16-19 квітня 2013р. ; Київ*. – 2013. – С. 290-292.
12. Ермакова И.И. Модель терморегуляции человека для оценки холодового стресса на воздухе и в воде / И.И. Ермакова, А.Ю. Николаенко, Ю.Н. Солопчук // *Управляющие системы и машины*. – 2014.- № 5. – С. 6-12.
13. Eyolfson D. A. Measurement and prediction of peak shivering intensity in humans / D. A. Eyolfson, P. Tikuisis, X. Xu, G. Weseen, G. G. Giesbrecht // *European Journal of Applied Physiology*. – 2001. – Vol.84, №1-2. – P. 100-106.

References

1. Marino F., Booth J. J. Whole body cooling by immersion in water at moderate temperatures. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 1998, no.1, pp. 73-81.
2. Molnar G. W. (1946) Survival of hypothermia by men immersed in the ocean. *The journal of the american medical association*, vol. 131, no. 13, pp. 1046-1050.
3. Golden F. (2002) *Essentials of Sea Survival*. USA, Human Kinetics, 320 p.
4. Montgomery L. D. (1974) A model of heat transfer in immersed man. *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 2, no.1, pp. 19–46.

5. Wissler E. H. (1964) A Mathematical Model of the Human Thermal System. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, no.26, pp. 147–166.

6. Tikuisis P. and Keefe A. A. (1996) Prediction of sea survival time. *Defence and Civil Insitute of Environmental Medicine DCIEM*, vol. 96, no.12, pp. 12-32.

7. Xu X., Turner C. A. and Santee W. R. (2011) Survival Time Prediction in Marine Environments. *Journal of Thermal Biology*, vol. 36, no.6, pp. 340–345.

8. Yermakova I.I. (2013) Informatsyonnaia platforma multikompartmentalnykh modelei termoregulatsyi cheloveka [Information platform of multicompartmental models of human thermoregulation]. *Kibernetika i vychislitelnaia tekhnika*, no.174, pp. 81-91.

9. Yermakova I.I. and Solopchuk Y.M. (2013) Komp'yuternaya model termoregulatsyi cheloveka pri pogruzhenii v vodu [Computer model of human thermoregulatory system during immersion]. *Kibernetika i vychislitelnaia tekhnika*, no.172, pp. 39-48.

10. Yermakova I.I., Solopchuk Y.M. and Tadeeva J.P. (2012) Heat exchange model for prediction of human thermal state in water. *Electronics and Nanotechnology, Proc. XXXII int. conf.*, P.200.

11. Yermakova I., Solopchuk Y. and Khudyakova L. (2013) Heat production, heat transfer and heat exchange in man during water immersion. *Electronics and Nanotechnology, Proc. IEEE XXXIII int. conf.*, pp. 290-292.

12. Yermakova I., Solopchuk Y. and Nikolaienko A. (2014) Model termoregulatsyi cheloveka dlia otsenki kholodovogo stressa na vozdukhe i v vode [Model of human thermoregulation for cold stress evaluation in air and water]. *Upravliaiushchie sistemy i mashyny*, no.5, pp. 6-12.

13. Eyolfson, D. A., Tikuisis, P., Xu, X., Weseen, G. and Giesbrecht, G. G. (2001) Measurement and prediction of peak shivering intensity in humans. *European Journal of Applied Physiology*, vol.84, no.1-2, pp. 100–106.

Єрмакова І. Й., Іванушкіна Н. Г., Солопчук Ю. М., Ніколаєнко А. Ю. Комплекс комп'ютерних моделей для оцінки холодового стресу у воді. У роботі представлено комплекс комп'ютерних моделей для прогнозу теплофізіологічного стану людини у воді на базі математичних моделей терморегуляції людини та результати його застосування для оцінки холодового стресу. Показано вплив температури води та рівня занурення на теплофізіологічний стан людини та час настання гіпотермії.

Ключові слова: моделювання, терморегуляція, гіпотермія, вода, холодовий стрес.

Єрмакова И. И., Иванушкина Н. Г., Солопчук Ю. Н., Николаенко А. Ю. Комплекс компьютерных моделей для оценки холодового стресса в воде.

В работе представлен комплекс компьютерных моделей для прогноза теплофизиологического состояния человека в воде на базе математических моделей терморегуляции человека и результаты его применения для оценки холодового стресса. Показано влияние температуры воды и уровня погружения на теплофизиологическое состояние человека и время наступления гипотермии.

Ключевые слова: моделирование, терморегуляция, гипотермия, вода, холодовой стресс.

I. Yermakova, N. Ivanushkina, A. Nikolaienko, Yu. Solopchuk. Complex of computer models for cold stress evaluation in water.

Introduction. Due to the high value of water thermal conductivity comparing to air, stay of man in cold water (water temperature lower than 25 °C) is associated with high life and health hazard. One of the ways to evaluate survival time of human in water is usage of

statistics data about survivors and water temperature organized as tables and curves. Another method to evaluate survival time and physiological state of man in water is computer modelling of human thermoregulatory system. Computer modelling allows to predict human thermal state in extreme environment without health hazard for man.

Main body. Information technology based on complex of mathematical models was developed to predict human thermophysiological state in cold water. The main component of complex is mathematical model of shivering in muscles. Shivering increases heat production up to four-fivefold of basal metabolic rate. Human thermophysiological state in case of accidental water immersion at temperature range from 5 to 25 °C was predicted using information technology. In order to evaluate influence of immersion level on hypothermia, computer modelling was performed for cases of full immersion, head out of water and immersion with head and arms out of water.

Conclusions. Developed complex of computer models allows to predict human thermophysiological state and evaluate cold stress in wide range of water temperature and the immersion level. The modelling results showed that the cooling rate increases with reduction in water temperature and the increase in percentage of immersed human body. When water temperature below 25 °C heat loss is always higher than shivering in muscles, thus body core temperature reduces at all levels of immersion. The safest case of immersion is immersion with head and arms out of water.

Keywords: modelling, thermoregulation, hypothermia, water, cold stress