



TIME OF DEATH ESTIMATION BASED ON OBSERVATION OF *POST-MORTEM* CHANGES, ESPECIALLY DECREASE IN BODY TEMPERATURE

Michał KALISZAN, Roman HAUSER, Zbigniew JANKOWSKI

Chair and Department of Forensic Medicine, Medical University of Gdańsk, Gdańsk

Abstract

In the paper, a broad review of the literature is presented concerning time of death estimation based on observation of *post-mortem* changes in corpses, especially decrease of dead body temperature measured at different body sites. The review was supplemented by the authors' own experiences on time of death estimation based on post mortem temperature measurements of the eyeball and orbit soft tissues.

Key words

Time of death; *Post-mortem* changes, Body temperature; Corpse.

Received 1 August 2006; accepted 21 August 2006

1. Introduction

Estimation of time of death is a problem which has accompanied forensic medicine from its very beginnings. Time of death estimation is one of the basic tasks of the forensic pathologist at the scene where a corpse has been revealed. Having made a preliminary diagnosis of the cause of death, the pathologist decides on the course of investigative actions and, in situations where a crime has been committed, he steers the investigation led by the prosecutor's office and by the police in the appropriate direction.

From the point of view of penal law, a precise estimation of time of death allows us to verify witnesses' testimonies, limit the number of suspects and assess their alibis, especially since nowadays it takes less and less time to travel even long distances. So, in the case of a not very precise or incorrect estimation of time of death, a false explanation by a suspect of being far

away from the crime scene at the time of the crime may be difficult to disprove.

Determination of time of death sometimes also matters from the point of view of civil law, since it may influence the order of inheritance or possible commitments resulting from the order of deaths. Such a problem may be faced when corpses of two or more related persons are revealed simultaneously (e.g. in the case of multiple homicide or several dead victims).

In spite of over a hundred years' attempts to develop methods for precise estimation of time of death, the accuracy of these methods, both when using one of them or several jointly, still does not meet standards approved by forensic medicine. For the first 6 hours after death, there is ± 2 h margin of error, in the next 14 hours after death, the margin of error increases to ± 3 h, and during the next 10 hours this margin of error increases to ± 4.5 h. The precision of the used methods decreases significantly when the process of dying finishes. So, from the moment of biological death of all

organs, which usually occurs about 24 hours after death, time of death estimation is only approximate [16, 41, 60, 61].

Currently known methods of time of death estimation can be divided into two groups. The first group consists in methods based on assessment of *post-mortem* processes that occur in corpses. The second group encompasses methods based on analysis of the process of cooling of corpses, where one measures the temperature of the corpse at various locations of the body (temperature-based methods). Methods from the second group are deemed to be more precise, especially in the primary period after death (less than 20 h).

2. Methods based on assessment of changes occurring after death

Among time of death estimation methods which are based on *post-mortem* changes in the human body during the first several dozen hours after death, the following are noteworthy: assessment of the degree of intensity and movability of hypostasis, development of rigor mortis, and drying out of cornea. Examination of interlethal reactions is also important, namely assessment of response of skeletal muscles to mechanical stimulus (Zsako's phenomenon) or electrical stimulus, the reaction of face muscles (orbicular muscles of eye and mouth) to electric stimulus, the reaction of the pupil to applying drops to the ocular conjunctiva or injecting an agent that contracts the pupil (e.g. pilocarpine, acetylcholine) or dilates the pupil (e.g. atropine) into the anterior chamber of the eye [7, 16, 41, 43, 60, 61, 69]. In a later period after death, an indication enabling investigators to approximate the time of death (to several days, weeks or even months) is the degree of advancement of so-called late changes, i.e. decaying, formation of adipocere, mummification of cadaver or possible peaty transformations.

In cases where only a skeleton remains, the precision of time of death estimation becomes even worse, for in assessment of the time of death, only appearance, weight or fragility of bones can be utilised. Examination of bones using ultraviolet fluorescence or determination of amino-acids present in bone makes the estimation of time of death more precise. However, this only makes it possible to estimate the minimum time that has passed from death, e.g. several dozen years. A method based on measurement of ^{14}C carbon activity may be used only in the case of remains that are at least a couple of hundred years old and hence has no practical value in forensic medicine [16, 60, 61].

The search for a method that allows us to estimate time of death also encompasses analysis of biochemical processes that occur in corpses, i.e. examination of enzymes in tissues and body fluids, determination of content of organic and inorganic compounds, including products of degradation of proteins [5, 6, 8, 37, 61]. Among methods using biochemical processes, especially worthy of note is the method of time of death estimation on the basis of liver enzymes activity: lactate dehydrogenase and malate dehydrogenase. It enables assessment of time of death with a precision to within several days, even as long as 35 days after death [21].

Increasingly important in assessing the time of death is a rapidly developing area of forensic medicine, namely forensic entomology. It is based on revealing the presence of and determining the stage of development of larvae and insects found on a corpse. This method may also be helpful in determining whether a corpse was moved from another environment that is typical for a certain species of insects [12, 13, 67].

Research on use of assessment of DNA decomposition to estimate the time when death occurred are also being conducted. The extent of DNA decomposition may be assessed with flow cytometry. This is, however, still an experimental method requiring further research. Up till now it has not been widely applied in forensic medicine [17, 46].

Among the newest achievements of forensic medicine in the area of time of death estimation is a method using one of the most modern analytical techniques, i.e. H-MRS (^1H – magnetic resonance spectroscopy). It has been used to identify products of brain tissue decomposition. According to numerous authors, H-MRS allows us to estimate time of death in a period of time between 30 to 400 h *post-mortem* [62].

Among other methods involving analyses of necrochemical processes, but until today recognised as less important because of low precision, one should mention analytical methods concerning the concentration of potassium or hypoxantine in the vitreous body of the eye [6, 41, 44, 46], chlorides in blood plasma [57], biochemical examination of synovial fluid [45] or cerebrospinal fluid [20, 44]. Scientists have also tried to estimate time of death on the basis of presence of food in stomach, assuming that food remains in the stomach approximately 2–3 h after consumption, with the stipulation that meals difficult to digest may stay in the stomach up to several hours [68]. There have also been attempts to use measurements of electrical impedance of tissues, in this way assessing the time of death to about the twentieth day after death [58].

3. Methods based on measurements of corpse temperature

The first author in the literature to publish an important work concerning estimation of time of death on the basis of post mortem decrease in temperature was Harry Rainy, professor at the University of Glasgow [59]. When analysing the literature, one may also find articles from an earlier time. Davey's work is cited [41], where the author described measurement of temperature of 8 corpses of British soldiers who had died on Malta in 1828, and then another 10 who had died in a colder climate, i.e. in Great Britain. However, Davey did not venture to assess the time of death on the basis of his examinations. Among other reports from this time, there are works by Dowler (or Fowler) from 1844 and 1845, and by Hensley dated 1846 [41], where measurements of temperature in various parts of corpses were discussed. Conclusions from this research were limited to recording in some cases the increase in temperature that occurred immediately after death. After publication of the mentioned reports, there was a break of about 17 years, after which a paper by Taylor and Wilkes [71] was published. These authors described measurements of temperature with a clinical thermometer applied to the skin of the abdomen. The method of examination presented by the authors, when analysed from today's perspective, does not ensure correctness of results because of the influence of external factors and the method of applying the thermometer. Nonetheless, Taylor and Wilkes observed a *post mortem* increase in body temperature, and a slower decrease in temperature soon after death, but they did not yet introduce the term plateau. They also observed that tissues located deeper in the corpse have an elevated temperature at the same time when skin temperature drops to the temperature of the surroundings. Also, these authors did not use the obtained results to elaborate a method of time of death estimation.

In 1863, Richardson [41] observed that in the case of death due to haemorrhage, the corpse cools down faster. He also noticed that in such cases, the time of death may be estimated erroneously, which might lead to an innocent person being accused of participation in a crime. In 1866, another researcher, Erb [18] observed in several cases a *post-mortem* increase in body temperature, then its stabilisation and slow decrease. Another researcher, Nysten [41] expressed the opinion, that in the case of strangulation, a corpse cools down over a longer period, even up to 3 days, than in cases of death caused by other factors. This opinion was criticised by Taylor and Wilkes [71], who stated

that a body cools down equally quickly, independent of the cause of death.

Rainy [59] was the first to apply Newton's law of cooling to the process of cooling of a corpse, taking into account the temperature of the surroundings as a factor. By measuring temperature in the rectum of deceased persons several times, he managed to establish experimentally the gradient of the curve of temperature decrease against time, in accordance with Newton's cooling coefficient. Moreover, this researcher confirmed the existence of an initial phase of slower decrease in temperature, which was also later described by Shapiro [66] as the plateau phase of temperature decrease, and he determined the calculated time of death as the minimum time. Rainy's calculations, based on a logarithmic calculation, allowed determination of the probable time range when death occurred. Independently of this, Rainy demonstrated the uselessness of measurements of skin temperature in the determination of time of death, as well as the unfavourable influence of changes in temperature of surroundings on the usefulness of body temperature measurements for time of death estimation.

Soon after Rainy's report, Seydeler [65] observed an irregular decrease in temperature measured under the arm, i.e. slowly at the beginning, then faster, and again slower. He also found that the clothes a dead person was wearing did not have a significant influence on cooling of the body. He proposed that time of death be determined on the basis of tables he had drawn up, in which this time was presented, accurate to within one hour.

In 1880 a paper by Burman [11] was published, where the author, who measured temperature under the arm with a self-constructed thermometer (allowing a temperature reading without necessity of taking out the thermometer from under the arm), came to the conclusion that the decrease of temperature in the first 12 h after death is of linear nature and equals 1.6°F/h (corresponding to about 0.9°C/h). He did not notice an initial slower cooling of the corpse.

Another researcher dealing with post mortem decrease in body temperature was Womack [72], who in 1887 conducted a series of experiments using a clinical thermometer. He fastened this thermometer with a tape to the surface of the abdomen. He claimed that he was able to do readings on the thermometer with an accuracy to within 1/4 of a degree, which seems highly unlikely. Neither did he observe a post-mortem plateau of temperature. Complicated mathematical calculations proposed by Womack were supposed to allow one to determine time of death with an accuracy to within several minutes, which – similarly to the preci-

sion of measurements indicated by his thermometer – is impossible.

In the interwar period, two works by a German scientist, Mueller [55, 56], were published, where he described experiments he conducted using very modern apparatus for those times, i.e. a thermoresistor. Results of research were continuously registered on an automatically moving paper tape. The possessed equipment allowed him to continuously monitor temperature in the rectum in a way unattainable before. In his publications, Mueller included diagrams of variability of temperatures, taking into account the thickness of fatty tissue. He also presented appropriate tables allowing determination of time of death at different temperatures of surroundings. He noted, however, that the time of death should be determined by a specialist in forensic medicine not only on the basis of the results obtained by Mueller himself, but also on the basis of other methods not connected with temperature measurements. He did not observe the plateau of temperature decrease either.

After a break in carrying out research on time of death estimation methods, in 1953 Schwarz and Heidenwolf [63] presented the first standardised sigmoidal curve, showing a significant slowdown in cooling of a corpse in the first period after death. This curve was supposed to be applicable within a limited temperature range (about 17°C) for any body weight and any clothes worn by the deceased person. However, Schwarz and Heidenwolf's curve was never applied.

In 1955 De Saram et al. [15] measured temperature in the rectum in criminals just after execution. This special situation gave them an opportunity to begin temperature measurements a very short time after death. Examinations were conducted in a hot climate, in surroundings of about 30°C, which limited the application of the mathematically described curves of temperature to these climatic conditions – which are rather rare in Europe. Nonetheless, De Saram et al. [15] added an important factor to the one-exponential model of temperature decrease previously proposed by other researchers, which took into account the post mortem slowdown of temperature decrease (plateau). Thanks to this, calculations of time of death were characterised by a relatively small dispersion of error.

In a further paper, De Saram [14] measured temperature in liver and observed that during the first couple of hours after death temperature in this organ is similar to that measured in the rectum.

In 1956 Lyle and Cleveland [42], taking advantage of technological progress, used a 6-channel thermometer allowing continuous measurement and recording

of temperature in 6 different places. These authors conducted simultaneous measurements of the temperature of the skin of the chest, skin of the forehead, rectum, liver, brain, and thigh muscles. However, they did not develop any useful method of time of death estimation, although they noticed some interesting facts. It turned out that temperature-time curves for the brain are the most regular, and such curves for skin are the least regular. They also noticed that time elapsed since death cannot be reliably determined more than 24 hours from the moment of death or when body temperature decreases so that it is almost the same as the temperature of the surroundings.

A paper published in 1958 by Fiddes and Patten [19] constituted a sort of breakthrough in research on time of death estimation on the basis of measurement of body temperature. These authors hoped to determine the rate of *post-mortem* decrease in temperature on the basis of at least double measurements in some time intervals. They standardised the decrease of temperature, assuming that at the moment of death it equals 0, and after finishing the process of cooling it is 1. They expressed the decrease in temperature from the standard initial one (37°C) to the temperature of the surroundings as a proportional difference. A disadvantage of this method was the necessity of at least double measurements of the temperature of the corpse at clear time intervals without moving the corpse, and an assumption that the temperature of the surroundings from the moment of death to the end of measurements was stable. When, in 1965, James and Knight [38] checked this method on cases examined by them they did not ascertain its superiority over methods based on a one-exponential function.

In 1958, Sellier [64] presented an original approach to the description of body temperature decrease. He used a thermodynamic model of an infinitely long cylinder as a theoretical model of the human body. For mathematical calculations, Sellier used data obtained by De Saram et al [15]. He proved mathematically that the body radius is the most important factor characterising curves of cooling, and additional factors such as clothes and body covering are less important. Sellier also observed slower body cooling in the first period after death. He argued it was not a result of the thermo-insulating properties of the fatty tissue, but that this tissue results in a greater volume and hence greater body radius (cylinder). The function describing this model allows us to determine the gradient of temperature and the influence of the peripheral conditions of cooling. On the other hand, the author himself considered that his model might turn out to be too complicated to be used in everyday practice.

As can be seen, the achievements in area of estimation of time of death presented above, resulting from analysis of the process of corpse cooling were only partially successful, and in some cases were even a step back.

Important progress was made in 1962, i.e. about 100 years after Rainy's elaboration of a model based on Newton's law of cooling. It was then that Marshall and Hoare [49] proposed a two-exponential model, showing that a body during the first 12 h after death does not cool down in accordance with Newton's law, but a bit slower. The course of the temperature decrease curve was sigmoidal in character. They looked for the causes of slower decrease in temperature during the initial period after death in post mortem metabolism and in production of heat, and in the influence of surface tissues with limited thermal conductivity. Marshall and Hoare further showed that the model they elaborated may also be used for clothed bodies, but if the corpse is moved or rotated in any way etc., this may result in increasing the error in time of death assessment. Summarising their then research, Marshall [48] concluded that "assessment of time of death on the basis of temperature measurements of a body will only ever be an approximation".

As was mentioned before, the first author who used the expression plateau in relation to post mortem temperature decrease and devoted a publication to this issue, was Shapiro [66]. In his work, he emphasised that any method of estimation of time of death must take into account the initial, slower decrease of temperature.

In 1974, Brown and Marshall [10] showed that use of more than two exponential elements only complicated the model without giving more precise results. However, when one used a two-exponential model, one might individually determine the time of death, measuring temperature in rectum only once and taking into account body proportions and temperature of surroundings in standardised conditions of cooling. The formula describing the two-exponential model was first used at the end of the 1980's, when Henssge [29] modified it in a certain way. Namely, he presented a simplified method of determination of Newton's cooling coefficient and determined statistical values of deviation between calculated and actual time of death for the process of cooling in standardised conditions. Through examination of the process of body cooling conducted on numerous corpses and on specially developed "phantoms" filled with gel (simulations of the human body), Henssge et al. broadened the range of application of the method to encompass various conditions of cooling, using empirical corrective multipliers

for body mass, various types of clothing and conditions in which the given corpse is found. They also created nomograms, which are still used today by forensic medical doctors, which allow us to easily "read", and not calculate the time of death [29, 31, 33]. Computer software created on the basis of Henssge et al.'s work is also used for "reading" the time of death [36].

In further research, the range of application of the "nomogram" method was extended to various conditions of cooling, e.g. a corpse floating in water [24] or exposed to sudden changes of temperature of surroundings [3]. For such conditions, possible variations between read time and actual time of death were also marked on the nomogram.

The "phantoms" designed by Henssge et al. [28] can also be used when reconstructing the course of body cooling in any conditions (surroundings), including the place where the given body was found. Verifying examinations, conducted with the use of "phantoms" and real corpses, authenticated the "nomogram" method, which has been accepted (and is currently used) as the leading method used for determination of time of death in the early post mortem period [29, 31, 41].

In the 1980's, Hiraiwa [34] dealt with determination of the time of death on the basis of temperature measurements. He developed the conception proposed in the fifties by Sellier [64], who assumed that the human body is an infinitely long cylinder. Hiraiwa's work was based on temperature measurements in the rectum. He assessed the error of his method as less than 1 h, and to facilitate readings of time of death he developed special software. Unfortunately, Hiraiwa [34] was not able to avoid some simplifications, which in practice may have significantly increased the declared error in assessment of the time of death.

In 1985 Green and Wright [22] published a paper where they described a method of estimation of time of death without the need to use body mass parameters. The technique proposed by these authors consists of double temperature measurements in the rectum at 1 h intervals and measurement of the temperature of the surroundings. The time that passed from the moment of death was calculated on the basis of a coefficient read from a graph drawn up by the authors, showing a theoretical cooling curve.

Attempts were also undertaken to use other body points to measure body temperature. The brain turned out to be a place where a relatively precise assessment of time of death was possible, especially in the first 6 h after death (accurate to ± 1.5 h) [9, 23, 26]. Brinkmann, Henssge et al. developed a nomogram for the brain which enabled easy "reading" of time that had passed from death using the same rule as for temperature in

the rectum. An advantageous factor in the case of the brain is the lack of influence of body mass on its temperature. On the other hand, the error of time of death estimation may increase because of varying amount of hair or covering of head, which influences the thermal isolation of the brain. A factor that undoubtedly makes the use of brain temperature measurements more difficult is the necessity to insert a probe inside the skull.

In the 1990's, Baccino et al. [4] conducted a series of experiments based on outer ear temperature measurement. The temperature was measured and monitored with a probe inserted into the ear, the tip of which adhered to the tympanic membrane. The plateau of *post-mortem* decrease in outer ear temperature was not observed. The proposed method could be used in temperature surroundings of between 16°C and 23°C. According to the authors, the results were characterised by accuracy similar to that of the "nomogram" method by Henssge, and in the initial period after death this accuracy was even greater. Additionally, an important advantage was the possibility of using it as an alternative method when suspecting a sexual background to a crime (there is not infringement of the rectum).

Special attention should be devoted to the significant contribution of Polish researchers to research on post mortem decrease in body temperature in the context of estimation of time of death. In the mid 1980's, Miścicka-Śliwka and Śliwka published a series of works [50, 51, 52, 53, 54, 70], where they described their own examinations on the usefulness of corpse temperature measurements in several places on the body in the assessment of time of death. From this research, it turned out that the best place for measurements is the heart. Miścicka-Śliwka and Śliwka elaborated a nomogram enabling "reading" of the time of death on the basis of heart temperature measurement, taking into account the circumference of the chest. They also ascertained, similarly to German researchers [9, 23, 26], the usefulness of brain temperature measurement and its high correlation with time of death.

When discussing the latest research on body temperature measurements serving in assessment of time of death, one ought to mention a method developed by Al-Alousi et al. [1, 2], based on temperature measurement with microwave thermography in three places in the body: brain, liver, and rectum. On the basis of their research, these authors constructed curves of the medium course of cooling of the given places, separately for the naked and covered body, and worked out a triple-exponential equation which uses data from the conducted measurements in three places. This method, however, requires knowledge on temperature of the given organs at the moment of death, and inaccuracy in

this matter leads to large errors in time of death assessment [41].

Recent research by Mall et al. [47] was an attempt to determine the time of death in cases where knowledge concerning conditions in which the corpse was found is incomplete. Continuous monitoring of body temperature to determine the velocity of cooling, lasting for as much as several hours, was to help in assessment of time of death. On this basis, the conditions of the surroundings were to be determined, and then the time of death.

In 2005, a paper by Kaliszan et al. [39] was published, describing temperature measurements in the eyeball and in the soft tissues of the orbit to estimate the time that had passed from the moment of death. Examinations were conducted on animals (pigs) because their eyeballs, in terms of anatomy and physiology, correspond most closely to human ones. The results of this research confirm the validity of using the eyeball as well as the orbit soft tissues as temperature measurement points in the early phase after death. On the basis of their own research, Kaliszan et al. concluded that, in the case of cooling of the eyeballs and orbit soft tissues, no plateau phenomenon occurs (i.e. a slower decrease in temperature in the initial period after death). Thanks to this, use of a one-exponential equation to describe the decrease in eyeball temperature over time ensures achievement of the most precise estimation of time of death in a period not longer than 13 h after death. In the case of orbit soft tissues, precision of time of death estimation is superior to that based on measurements taken in muscles and in rectum up to 10.5 h after death. On the other hand, in a later period, a better assessment is ensured by data from temperature measurements in the muscles and in the rectum.

In a further study, Kaliszan [40] confirmed the lack of a plateau in the cooling of eyeballs and orbit soft tissues, introduced a double-exponential equation that allows an even more accurate estimation of the time of death in the first hours after death, and also showed that a little flow of air in a room where the body is placed (wind below 2 degrees on the Beaufort scale) does not significantly influence the rate of body cooling, and that the temperature of the surroundings is an important factor in such a situation.

On the basis of own examinations, Kaliszan et al. [39, 40] concluded that implementation of the method of estimation of time of death, developed during experiments with animals, based on temperature measurements of the eyeball and orbit soft tissues, into forensic medical practice (relating to people) is well-founded, although it still requires verifying experi-

ments on human corpses using methodology developed on pigs.

4. Methods combining corpse temperature measurement and observation of post-mortem changes

Some authors recommend determination of time of death by application of several methods. Body temperature is measured in more than one point (e.g. in rectum and in brain) [25] and also body temperature measurement is combined with other methods of time of death estimation [30, 32]. According to Henssge and Madea [33], especially a combination of body temperature measurement, assessment of degree of intensity and movability of hypostasis, development of rigor mortis, assessment of response of skeletal muscles to mechanical and electrical stimulus, and pharmacological reactivity of pupil turned out to be more reliable and allowed assessment of the time of death more accurately than any of the previously described methods. In some situations the range between the lower and upper limits of time of death, determined by temperature measurement, may be narrowed by taking into account one or more additional parameters.

References

1. Al-Alousi L. M., Anderson R. A., Worster D. M., [et al.], Multiple-probe thermography for estimating the *post-mortem* interval: I. Continuous monitoring and data analysis of brain, liver, rectal and environmental temperatures in 117 forensic cases, *Journal of Forensic Sciences* 2001, 46, 317–322.
2. Al-Alousi L.M., Anderson R.A., Worster D. M. [et al.], Multiple-probe thermography for estimating the *post-mortem* interval: II. Practical versions of the triple-exponential formula (TEF) for estimating the time of death in the field, *Journal of Forensic Sciences* 2001, 46, 323–327.
3. Althaus L., Henssge C., Rectal temperature time of death nomogram: sudden change of ambient temperature, *Forensic Science International* 1999, 99, 171–178.
4. Baccino E., De Saint Martin L., Schullier Y. [et al.], Outer ear temperature and time of death, *Forensic Science International* 1996, 83, 133–146.
5. Balasooriya B. A. W., Hill C. A. S., Williams A. R., The biochemical changes in pericardial fluid after death. An investigation of the relationship between time since death and the rise or fall in electrolyte and enzyme concentrations and their possible usefulness in determining the time of death, *Forensic Science International* 1984, 26, 93–102.
6. Balasooriya B. A. W., Hill C. A. S., Williams A. R., The biochemistry of vitreous humor. A comparative study of the potassium, sodium and urate concentrations in the eyes in identical time intervals after death, *Forensic Science International* 1984, 26, 85–91.
7. Bardzik S., The efficiency of methods of estimating the time of death by pharmacological means, *Journal of Forensic Medicine* 1966, 13, 141–143.
8. Bendall J. R., Davey C. L., Ammonia liberation during rigor mortis and its relation to changes in the adenine and inosine nucleotides of rabbit muscle, *Biochimica & Biophysiological Acta* 1957, 26, 93–103.
9. Brinkmann B., Menzel G., Riemann U., Postmortale Organtemperaturen unter verschieden Umweltbedingungen, *Zeitschrift für Rechtsmedizin* 1978, 82, 207–216.
10. Brown A., Marshall T., Body temperature as a means of estimating the time of death, *Forensic Science International* 1974, 4, 125–133.
11. Burman J., On the rate of cooling of the human body after death, *Edinburgh Medical Journal* 1880, 25, 993–1003.
12. Campobasso C. P., Linville J. G., Wells J. D. [et al.], Forensic genetic analysis of insect gut content, *American Journal of Forensic Medicine and Pathology* 2005, 26, 161–165.
13. Clark K., Evans L., Wall R., Growth rates of the blowfly, *Lucilia sericata*, on different body tissues, *Forensic Science International* 2006, 156, 145–149.
14. De Saram G., Estimation of the time of death by medical criteria, *Journal of Forensic Medicine* 1957, 4, 73–82.
15. De Saram G., Webster G., Kathirgamataby N., *Post-mortem* temperature and the time of death, *Journal of Criminological, Law, Criminology and Police Sciences* 1955, 1, 562–577.
16. DiMaio V. J., DiMaio D., *Ustalanie czasu śmierci*, [w:] *Medycyna sądowa*, Urban & Partner, Wrocław 2003.
17. Di Nunno N. R., Constantinides F., Bernasconi P. [et al.], Is flow cytometric evaluation of DNA degradation a reliable method to investigate the early postmortem period?, *American Journal of Forensic Medicine and Pathology* 1998, 19, 50–53.
18. Erb W., Über die Agoniesteigerung der Koperwärme bei Krankheiten des Centralnervensystems, *Deutsches Archiv für Klinische Medizin* 1866, 12, 175–195.
19. Fiddes F. S., Patten T. D., Patent percentage method for representing the fall in body temperature after death. Its use in estimating the time of death. With a statement of the theoretical basis of the percentage method, *Journal of Forensic Medicine* 1958, 5, 2–15.
20. Fracchini F., Muller E., Zanoboni A., Postmortem increase of potassium in human cerebrospinal fluid, *Nature* 1963, 98, 1208.
21. Gos T., Raszeja S., Postmortem activity of lactate and malate dehydrogenase in human liver in relation to time after death, *International Journal of Legal Medicine* 1993, 106, 25–29.
22. Green M., Wright J., Post-mortem interval estimation from body temperature data only, *Forensic Science International* 1985, 28, 35–36.

23. Henssge C., Beckmann E. R., Wischhusen F., Nomographische Bestimmung der Todeszeit durch Messung der Hirntemperatur, *Beitrage Gerichtige Medizin* 1984, 42, 107–111.
24. Henssge C., Brinkmann B., Puschel K., Todeszeitbestimmung durch Rektaltemperaturmessungen bei Wassersuspension der Liche, *Zeitschrift für Rechtsmedizin* 1984, 92, 255–276.
25. Henssge C., Frekers R., Reinhardt S. [et al.], Todeszeitbestimmung auf der Basis simultaner Messungen von Hirn- und Rektaltemperatur, *Zeitschrift für Rechtsmedizin* 1984, 93, 123–133.
26. Henssge C., Beckmann E. R., Wischhusen F. [et al.], Determination of the time of death by measurement of central brain temperature, *Zeitschrift für Rechtsmedizin* 1985, 93, 1–22.
27. Henssge C., Madea B., Gallenkemper E., Todeszeitbestimmung-Integration verschiedener Teilmethoden, *Zeitschrift für Rechtsmedizin* 1985, 95, 185–196.
28. Henssge C., Hahn S., Madea B., Praktische Erfahrungen mit einem Abkühlungsdummy, *Beitrage Gerichtige Medizin* 1986, 44, 123–126.
29. Henssge C., Death time estimation in case work. I. The rectal temperature time of death nomogram, *Forensic Science International* 1988, 38, 209–236.
30. Henssge C., Madea B., Gallenkemper E., Death time estimation in case work. II. Integration of different methods, *Forensic Science International* 1988, 39, 77–87.
31. Henssge C., Althaus L., Bolt J. [et al.], Experiences with a compound method for estimating the time since death. I. Rectal temperature nomogram for time since death, *International Journal of Legal Medicine* 2000, 113, 303–319.
32. Henssge C., Althaus L., Bolt J. [et al.], Experiences with a compound method for estimating the time since death. II. Integration of non-temperature-based methods, *International Journal of Legal Medicine* 2000, 113, 320–331.
33. Henssge C., Madea B., Estimation of the time since death in the early post-mortem period, *Forensic Science International* 2004, 144, 167–175.
34. Hiraiwa K., Estimation of post-mortem interval from rectal temperature with the use of computer, *Medicine, Science and Law* 1980, 20, 115–125.
35. Honjyo K., Yonemitsu K., Tsunenari S., Estimation of early postmortem intervals by a multiple regression analysis using rectal temperature and non-temperature based postmortem changes, *Journal of Clinical Forensic Medicine* 2005, 12, 249–253.
36. <http://www.pathguy.com/TimeDead.htm>.
37. Jakliński A., Bryc R., Zachowanie aktywności adenyzyjno-trójfosfatazy i 5-nukleotyduzy w mięśniach szkieletowych szczurów we wczesnym okresie pośmiertnym, *Archiwum medycyny sądowej i kryminalistyki* 1974, 24, 275–278.
38. James W., Knight B., Errors in estimating time since death, *Medicine, Science and Law* 1965, 5, 111–116.
39. Kaliszan M., Hauser R., Kaliszan R., [et al.], Verification of the exponential model of body temperature decrease after death in pigs, *Experimental Physiology* 2005, 90, 727–738.
40. Kaliszan M., Określanie czasu zgonu na podstawie pomiarów temperatury wybranych okolic ciała. Badania na modelu zwierzęcym [nieopublikowana rozprawa doktorska, Akademia Medyczna w Gdańsku, Gdańsk 2006].
41. Knight B. [ed.], The estimation of the time since death in the early postmortem period, Arnold, London 2002.
42. Lyle H., Cleveland F., Determination of the time of death since death by heat loss, *Journal of Forensic Science* 1956, 1, 11–24.
43. Madea B., Henssge C., Electrical excitability of skeletal muscle postmortem in casework, *Forensic Science International* 1990, 47, 207–227.
44. Madea B., Kaferstein H., Herman N. [et al.], Hypoxantine in vitreous humor and cerebrospinal fluid – marker of postmortem interval and prolonged (vital) hypoxia?, *Forensic Science International* 1994, 65, 19–31.
45. Madea B., Kreuser C., Banaschak C., Postmortem biochemical examination of synovial fluid – a preliminary study, *Forensic Science International* 2001, 118, 29–35.
46. Madea B., Is there recent progress in the estimation of the postmortem interval by means of thanatochemistry?, *Forensic Science International* 2005, 151, 139–149.
47. Mall G., Eckl M., Sinicina I. [et al.], Temperature-based death time estimation with only partially known environmental conditions, *International Journal of Legal Medicine* 2005, 119, 185–194.
48. Marshall T., Estimating the time of death, *Journal of Forensic Sciences* 1962, 7, 189–210.
49. Marshall T., Hoare F., Estimating the time of death – the rectal cooling after death and its mathematical representation, *Journal of Forensic Sciences* 1962, 7, 56–81.
50. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K., Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. I. Pośmiertny spadek temperatury w mózgu, *Archiwum medycyny sądowej i kryminologii* 1984, 34, 223–232.
51. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K., Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. II. Pośmiertny spadek temperatury w odbyticy, *Archiwum medycyny sądowej i kryminologii* 1985, 35, s. 1–7.
52. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K., Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. III. Pośmiertny spadek temperatury w wątrobie, *Archiwum medycyny sądowej i kryminologii* 1985, 35, 73–78.
53. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K., Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. IV. Pośmiertny spadek temperatury w sercu, *Archiwum medycyny sądowej i kryminologii* 1985, 35, 79–84.
54. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K., Nomogram do obliczania czasu śmierci na podstawie wartości temperatury mierzonej w sercu i obwodzie klatki piersiowej, *Archiwum medycyny sądowej i kryminologii* 1986, 36, 15–20.
55. Mueller B., Mastdarmtemperatur der Liche und Todeszeit, *Deutsch Zeitschrift für Gerichtliche Medizin* 1937, 28, 172–177.
56. Mueller B., Das Verhalten der Mastdarmtemperatur der Liche unter verschiedenen aussren Bedingungen,

- Deutsch Zeitschrift für Gerichtliche Medizin* 1938, 29, 158–162.
57. Querido D., Linearization of the relationship between postmortem plasma chloride concentration and postmortem interval in rats, *Forensic Science International* 1990, 45, 117–128.
 58. Querido D., Philips M. R., Estimation of postmortem interval. Temperature-correction of extracellular abdominal impedance during the first 21 days of death, *Forensic Science International* 2001, 116, 133–138.
 59. Rainy H., On the cooling of dead bodies as indicating the length of time since death, *Glasgow Medical Journal* 1868, 1, 323–330.
 60. Raszeja S., Nasilowski W., Markiewicz J., *Medycyna sądowa. Podręcznik dla studentów, PZWL, Warszawa* 1993.
 61. Saukko P., Knight B., *Knight's forensic pathology*, Arnold, London 2004, 52–97.
 62. Scheurer E., Itch M., Dietrich R. [et al.], Statistical evaluation of time-dependent metabolite concentrations: estimation of postmortem intervals based on in situ 1H MRS of the brain, *NMR Biomedicine* 2005, 18, 163–172.
 63. Schwarz F., Heidenwolf H., Le refroidissement post mortem. Sa signification a quanta l'heure du deces, *Revue Pollice Criminologie* 1953, 8, 339–344.
 64. Sellier K., Determination of the time of death by extrapolation of the temperature decrease curve, *Acta Medicinæ Legalis et Socialis* 1958, 2, 279–302.
 65. Seydeler R., Nekrothermometrie, *Vierteljahrschrift für die Praktische Heilkunde* 1869, 26, 137–148.
 66. Shapiro H. A., The postmortem temperature plateau, *Journal of Forensic Medicine* 1965, 12, 137–141.
 67. Smith K. G. V., *A manual of forensic entomology*, Cornell University Press, Ithaca 1986.
 68. Suzuki S., Experimental studies on the presumption of the time after food intake from stomach contents, *Forensic Science International* 1987, 35, 83–117.
 69. Śliwka K., Ocena pośmiertnej pobudliwości elektrycznej mięśnia szkieletowego szczurów i jej znaczenie dla określenia czasu śmierci [niepublikowana rozprawa habilitacyjna, Akademia Medyczna w Gdańsku, Gdańsk 1984].
 70. Śliwka K., Miścicka-Śliwka D., Badania nad przydatnością wybranych punktów pomiarowych temperatury zwłok dla określenia czasu śmierci na podstawie wielopunktowej ciągłej rejestracji temperatury, *Archiwum medycyny sądowej i kryminologii* 1985, 35, 85–92.
 71. Taylor A., Wilkes D., On the cooling of the human body after death, *Guy's Hospital Reports* 1863, 9, 180–211.
 72. Womack F., The rate of cooling of the body after death, *St. Bart's Hospital Reports* 1887, 23, 193–200.

Corresponding author

Michał Kaliszan
Katedra i Zakład Medycyny Sądowej
Akademii Medycznej w Gdańsku
ul. Dębowa 23
PL 80-204 Gdańsk
e-mail: kizms@amg.gda.pl

OKREŚLANIE CZASU ŚMIERCI NA PODSTAWIE OBSERWACJI PROCESÓW POŚMIERTNYCH, W SZCZEGÓLNOŚCI SPADKU TEMPERATURY CIAŁA

1. Wstęp

Określanie czasu, w którym nastąpiła śmierć, jest problemem towarzyszącym medycynie sądowej od początków istnienia tej dziedziny wiedzy. Ustalenie czasu zgonu należy do podstawowych zadań medyka sądowego obecnego na miejscu ujawnienia zwłok. Wraz z wstępnym rozpoznaniem przyczyny zgonu determinuje on przebieg podjętych czynności śledczych, a w sytuacji, gdy popełniono przestępstwo, nadaje kierunek prowadzonemu przez prokuraturę i policję dochodzeniu.

W aspekcie prawa karnego precyzyjne ustalenie czasu śmierci pozwala na weryfikację zeznań świadków, zawężenie kręgu osób podejrzanych oraz ocenę podawanego przez nich alibi, zwłaszcza, że obecnie czas przemierzania się nawet na znaczne odległości staje się coraz krótszy. Tak więc, wobec mało dokładnej lub błędnej oceny czasu śmierci, niezgodne z prawdą tłumaczenie podejrzanego, że w chwili przestępstwa przebywał w odległym od jego popełnienia miejscu, może okazać się trudne do podważenia.

Ustalenie czasu śmierci ma niekiedy znaczenie również w aspekcie prawa cywilnego, gdyż może decydować o kolejności dziedziczenia lub ewentualnych zobowiązaniach wynikających z kolejności zgonów. Z problemem takim możemy mieć do czynienia, kiedy w jednym czasie zostaną ujawnione zwłoki dwóch lub więcej spokrewnionych osób (np. w sytuacji zbiorowego zabójstwa czy wypadku z kilkoma ofiarami śmiertelnymi).

Mimo podejmowanych w ciągu ostatnich przeszło 100 lat prób wypracowania metod pozwalających na precyzyjną ocenę czasu śmierci, dokładność tych metod, zarówno przy stosowaniu pojedynczych z nich, jak i łączeniu kilku, nadal nie spełnia warunków odpowiadających przyjętym w medycynie sądowej standardom. W pierwszych 6 h po śmierci określają ją granice błędu wynoszące ± 2 h, w kolejnych 14 h po śmierci zakres błędu wzrasta do ± 3 h, a podczas następnych 10 h ulega zwiększeniu do $\pm 4,5$ h. Dokładność stosowanych metod zmniejsza się zdecydowanie wraz z zakończeniem procesu umierania. Tak więc, od momentu śmierci biologicznej wszystkich narządów, co następuje zazwyczaj około 24 h po śmierci, szacowanie czasu zgonu ma wymiar jedynie orientacyjny [16, 41, 60, 61].

Aktualnie znane metody oceny czasu zgonu można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa to metody oparte na ocenie zachodzących w zwłokach procesów pośmiertnych. Druga grupa to metody oparte na analizie

procesu stygnięcia zwłok polegające na pomiarze temperatury zwłok w różnych miejscach ciała (ang. temperature-based methods). Metody drugiej grupy uznawane są za bardziej dokładne, szczególnie w początkowym (do 20 h) okresie po śmierci.

2. Metody oparte na ocenie zmian zachodzących po śmierci

Spośród metod wykorzystujących do oceny czasu śmierci pośmiertne zmiany zachodzące w organizmie ludzkim w pierwszych kilkudziesięciu godzinach po zgonie, należy wyróżnić określanie stopnia wysycenia i przemieszczalności płam opadowych, rozwinięcia stężenia pośmiertnego, wysychania rogówki oka, jak też badanie reakcji interletalnych polegające na ocenie pobudliwości mięśni szkieletowych na bodziec mechaniczny (zjawisko Zsako) lub elektryczny, reakcji mięśni twarzy (mięśni okrężnych oka i ust) na bodziec elektryczny, reakcji źrenicy oka na wkropienie do worka spojówkowego lub wstrzyknięcie do przedniej komory oka środków zwężających źrenicę (np. pilokarpiny, acetylocholino) lub ją rozszerzających (np. atropiny) [7, 16, 41, 43, 60, 61, 69]. W późniejszym okresie po śmierci wskazówką pozwalającą w dużym przybliżeniu (do kilku dni, tygodni, a nawet miesięcy) ocenić czas zgonu jest stopień zaawansowania tzw. przemian późnych, tj. gnicia, zmian tłuszczowo-woskowych, strupienia czy ewentualnego przeobrażenia torfowego.

W przypadku zwłok zeszkieletowanych dokładność ustalenia czasu śmierci ulega dalszemu pogorszeniu, a przy szacowaniu czasu śmierci opierać się można na wyglądzie, ciężarze czy kruchości kości. Bardziej precyzyjną ocenę czasu śmierci umożliwia badanie kości z wykorzystaniem fluorescencji ultrafioletowej lub określenie ilości obecnych w kościach aminokwasów. Niemniej jednak pozwala to na określenie jedynie minimalnego czasu, jaki upłynął od śmierci, np. kilkadziesiąt lat. Metoda wykorzystująca pomiar aktywności węgla ^{14}C może być użyta jedynie w przypadku szczątków liczących co najmniej kilka wieków i nie ma praktycznego zastosowania w medycynie sądowej [16, 60, 61].

Poszukiwania metody pozwalającej na określenie czasu zgonu obejmują również analizę procesów biochemicznych zachodzących w organizmie, tj. badanie aktywności enzymów w tkankach i płynach ustrojowych, oznaczanie zawartości związków organicznych i nie-

organicznych, w tym produktów rozkładu białek [5, 6, 8, 37, 61]. Z metod wykorzystujących procesy biochemiczne warta szczególnej uwagi jest metoda określania czasu śmierci na podstawie aktywności enzymów wątrobowych: dehydrogenazy mleczanowej i dehydrogenazy jabłczanowej. Pozwala ona na ocenę czasu zgonu z dokładnością do kilku dni, nawet do 35 dni po śmierci [21].

Coraz większe znaczenie dla ustalania czasu śmierci ma szybko rozwijająca się dziedzina medycyny sądowej, jaką jest entomologia sądowa. Opiera się ona na wykrywaniu obecności i określaniu stadium rozwoju larw i owadów znalezionych na zwłokach. Metoda ta może też być pomocna w ustaleniu, czy zwłoki były przemieszczane z innego, charakterystycznego dla danego gatunku owadów, środowiska [12, 13, 67].

Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem oceny stopnia rozpadu DNA do oceny czasu, w jakim nastąpiła śmierć. Stopień rozpadu DNA można ocenić za pomocą cytometrii przepływową. Jest to jednak jeszcze metoda eksperymentalna wymagająca dopracowania. Dotychczas nie znalazła ona szerszego zastosowania w praktyce medyczno-sądowej [17, 46].

Do najnowszych dokonań medycyny sądowej w zakresie określania czasu śmierci należy metoda wykorzystująca jedno z ostatnich osiągnięć technik analitycznych, tj. H-MRS (protonową spektroskopię rezonansu magnetycznego). Przy jej pomocy identyfikowano produkty rozkładu tkanki mózgowej. Według szeregu autorów, H-MRS pozwala na określenie czasu śmierci w okresie od około 30 do około 400 h *post mortem* [62].

Z innych metod wykorzystujących procesy nekrochemiczne, lecz dotychczas uznawanych za metody o mniejszym znaczeniu ze względu na ich niewielką dokładność, należy wymienić metody analityczne polegające na ocenie stężenia potasu lub hipoksantyny w ciałku szklistym oka [6, 41, 44, 46], chlorków w osoczu [57], badaniu biochemicznym płynu stawowego [45] czy płynu mózgowo-rdzeniowego [20, 44]. Czas śmierci próbowano również określać na podstawie obecności treści pokarmowej w żołądku, szacunkowo przyjmując, że pokarm pozostaje w żołądku średnio 2–3 h po jego spożyciu, przy czym zaznaczono, że posiłki tzw. ciężkostrawne mogą w nim zalegać nawet do kilku godzin [68]. Podejmowano także próby wykorzystania pomiarów impedancji elektrycznej tkanek, oceniając w ten sposób czas zgonu do około dwudziestego dnia po śmierci [58].

3. Metody oparte na pomiarze temperatury zwłok

W literaturze przedmiotu jako pierwszego autora, który opublikował ważną pracę poświęconą określaniu czasu zgonu na podstawie pośmiertnego spadku temperatury, wymienia się Harry Rainy'ego, profesora Uniwer-

sytetu w Glasgow [59]. Analizując piśmiennictwo, znaleźć można również doniesienia z okresu wcześniejszego. Cytowana jest praca Daveya [41], w której autor opisywał badania temperatury zwłok 8 żołnierzy brytyjskich zmarłych na Malcie w 1828 roku, a następnie 10 kolejnych zmarłych w chłodniejszym klimacie, tj. na Wyspach Brytyjskich. Jednak na podstawie swoich badań Davey nie pokusił się o ocenę czasu zgonu. Inne doniesienia z tego okresu to prace Dowlera (lub Fowlera) z lat 1844 i 1845 i Hensleya z 1846 r. [41], w których omawiano pomiary temperatury w różnych punktach ciała. Wnioski z tych badań ograniczały się do odnotowania w niektórych przypadkach wzrostu temperatury bezpośrednio po śmierci. Po opublikowaniu wymienionych doniesień nastąpił okres około 17 lat przerwy, po czym wydano drukiem pracę Taylora i Wilkesa [71]. Autorzy ci opisali pomiary temperatury skóry brzucha wykonywane za pomocą przykładanego do powierzchni ciała termometru rtęciowego. Przedstawiona przez nich metoda badań z aktualnego punktu widzenia nie zapewnia prawidłowości wyników ze względu na wpływ czynników zewnętrznych i sposobu przyłożenia termometru. Niemniej jednak Taylor i Wilkes zauważyli pośmiertny wzrost temperatury ciała oraz wolniejszy jej spadek we wczesnym okresie po śmierci, nie wprowadzając jeszcze terminu plateau. Zaobserwowali również, że głębiej położone tkanki mają podwyższoną temperaturę w czasie, kiedy skóra osiąga już temperaturę otoczenia. Również ci autorzy nie wykorzystali otrzymanych wyników do opracowania metody określania czasu zgonu.

W roku 1863 Richardson [41] zauważył, że w przypadku śmierci z wykrwawienia ciało ochładza się znacznie szybciej. Zwrócił przy tym uwagę, że w takich przypadkach czas śmierci może być błędnie oceniony, co spowodować mogło np. oskarżenie niewinnej osoby o udział w zbrodni. W 1866 roku inny badacz, Erb [18], obserwował w kilku przypadkach pośmiertny wzrost temperatury ciała, następnie jej ustabilizowanie się i powolny spadek. Kolejny badacz, Nysten [41], wyraził pogląd, że w przypadku śmierci przez uduszenie ciało stygnie znacznie dłużej, nawet do 3 dni, niż w przypadkach śmierci z przyczyn innych. Pogląd ten został podważony przez Taylora i Wilkesa [71], którzy stwierdzili, że ciało stygnie równie szybko, niezależnie od przyczyny śmierci.

Rainy [59] jako pierwszy zastosował wobec procesu stygnięcia zwłok newtonowskie prawo stygnięcia, uwzględniając w badaniach czynnik temperatury otoczenia. Mierząc kilkakrotnie temperaturę w odbytnicy zmarłych, zdołał doświadczalnie ustalić nachylenie krzywej spadku temperatury w czasie, zgodnie z newtonowskim współczynnikiem stygnięcia. Ponadto badacz ten potwierdził istnienie fazy początkowego wolniejszego spadku temperatury opisaną w późniejszym czasie przez Shapiro [66] jako faza *plateau* spadku temperatury oraz ustalił wyliczony czas zgonu jako czas minimalny. Obli-

czenia Rainy'ego, oparte na rachunku logarytmicznym, pozwalały na określenie prawdopodobnego przedziału czasowego, w którym mógł nastąpić zgon. Niezależnie od tego Rainy wykazał nieprzydatność pomiarów temperatury powierzchniowej skóry do określenia czasu zgonu, jak również niekorzystny wpływ zmian temperatury otoczenia na użyteczność pomiarów ciepłoty ciała w aspekcie ustalania czasu śmierci.

Wkrótce po doniesieniu Rainy'ego, Seydeler [65] zaobserwował nieregularny spadek temperatury mierzonej pod pachą, tzn. na początku powolny, później szybszy i znowu powolny. Stwierdził ponadto, że odzież, w jaką ubrany jest zmarły, nie ma większego wpływu na stygnięcie ciała. Zaproponował określanie czasu zgonu na podstawie opracowanych przez siebie tabel, w których czas ten podany był z dokładnością do godziny.

W roku 1880 ukazała się praca Burmana [11], w której autor na podstawie pomiarów temperatury mierzonej pod pachą za pomocą własnoręcznie skonstruowanego termometru (pozwalającego na odczyt temperatury bez wyjmowania termometru spod pachy) wyciągnął wniosek, że spadek temperatury w pierwszych 12 h po zgonie zachodzi liniowo i wynosi $1,6^{\circ}\text{F/h}$ (co odpowiada około $0,9^{\circ}\text{C/h}$). Nie zauważył przy tym występowania początkowego wolniejszego schładzania zwłok.

Kolejnym badaczem zajmującym się pośmiertnym spadkiem temperatury ciała był Womack [72], który w 1887 roku przeprowadził serię eksperymentów z użyciem termometru rtęciowego. Termometr ten przymocowywał za pomocą taśmy do powierzchni brzucha. Twierdził, że ze skali swojego termometru mógł odczytywać wartości temperatury z dokładnością do $1/4$ stopnia, co wydaje się wysoce wątpliwe. Również nie zaobserwował pośmiertnego plateau temperatury. Zaproponowane przez Womacka skomplikowane obliczenia matematyczne miały jakoby pozwolić na określenie czasu zgonu z dokładnością do kilku minut, co – podobnie jak dokładność wskazań zastosowanego termometru – jest nieprawdopodobne.

W okresie międzywojennym ukazały się dwie prace niemieckiego badacza, Muellera [55, 56], w których opisywał on eksperymenty z użyciem jak na tamte czasy bardzo nowoczesnej aparatury pomiarowej, tj. termorezystora, przy czym wyniki badań były zapisywane w sposób ciągły na automatycznie przesuwającej się papierowej taśmie. Posiadany sprzęt pozwalał na ciągłe monitorowanie temperatury w odbytnicy w sposób dotychczas nieosiągalny. W swoich publikacjach Mueller zawarł wykresy zmienności temperatur uwzględniające stopień rozwinięcia tkanki tłuszczowej. Zamieścił ponadto odpowiednie tabele pozwalające na określenie czasu zgonu przy różnych temperaturach otoczenia. Zaznaczył jednak, że czas zgonu powinien być ustalany przez specjalistę medycyny sądowej na podstawie nie tylko uzyskanych przez Muellera wyników, ale także w opar-

ciu o inne metody niezwiązane z pomiarem temperatury. Również on nie obserwował plateau spadku temperatury.

Po przerwie w prowadzeniu badań nad metodami określania czasu zgonu, w 1953 roku Schwarz i Heidenwolf [63] zaprezentowali pierwszą standardową krzywą sigmoidalną, wykazując znaczne spowolnienie stygnięcia ciała w pierwszym okresie po śmierci. Krzywa ta miała mieć zastosowanie w ograniczonym zakresie temperatur (około 17°C) dla dowolnej masy ciała i każdego rodzaju ubrania zwłok. Jak się później okazało, krzywa Schwarza i Heidenwolfa nie znalazła zastosowania.

W roku 1955 De Saram i in. [15] przeprowadzili pomiary temperatury w odbytnicy u przestępców po wykonaniu na nich kary śmierci. Szczególna sytuacja dawała im możliwość rozpoczynania pomiarów temperatury bardzo krótko po zgonie. Badania były prowadzone w gorącym klimacie, w temperaturze otoczenia około 30°C , co ograniczało użycie matematycznie opisanych krzywych spadku temperatury w czasie do takich, rzadko spotykanych w Europie, warunków klimatycznych. Niemniej jednak De Saram i in. [15] do proponowanego przez dotychczasowych badaczy modelu jednowykładniczego spadku temperatury dodali istotny składnik uwzględniający pośmiertne spowolnienie spadku temperatury (*plateau*). Dzięki temu obliczenia czasu śmierci charakteryzowały się względnie małym rozrzutem błędów.

W kolejnej pracy De Saram [14] prowadził pomiary temperatury w wątrobie i zauważył, że w pierwszych kilku godzinach po śmierci temperatura w tym narządzie jest zbliżona do temperatury mierzonej w odbytnicy.

W 1956 roku Lyle i Cleveland [42], korzystając z postępu technologicznego, zastosowali 6-kanalowy termometr pozwalający na ciągły pomiar i zapis temperatury w sześciu różnych miejscach. Autorzy ci wykonali jednoczesne pomiary temperatury skóry klatki piersiowej, skóry czoła, odbytu, wątroby, mózgu i mięśni uda. Nie wypracowali jednak żadnej użytecznej metody określania czasu zgonu, chociaż zauważyli interesujące fakty. Okazało się, że krzywe temperatura-czas dla mózgu mają najbardziej regularny charakter, natomiast odpowiednie krzywe dla skóry najmniej. Zauważyli ponadto, że czas, jaki upłynął od śmierci, nie może być wiarygodnie określony po 24 h od chwili zgonu, lub wtedy, gdy temperatura ciała obniży się na tyle, że nieznacznie różni się od temperatury otoczenia.

Pewnym przełomem w badaniach nad ustaleniem metody określania czasu śmierci w oparciu o pomiar temperatury zwłok była praca opublikowana w 1958 roku przez Fiddesa i Pattena [19]. Autorzy ci wiązali nadzieje z ustaleniem szybkości pośmiertnego spadku temperatury ciała na podstawie co najmniej dwukrotnych pomiarów w pewnym odstępie czasu. Wystandaryzowali spadek temperatury, przyjmując, że w chwili śmierci wynosi on 0, natomiast po zakończeniu procesu stygnięcia równa się 1. Spadek temperatury od standardowej wyjściowej

(37°C) do temperatury otoczenia wyrazili jako różnice procentową. Wadą tej metody była konieczność co najmniej dwukrotnego pomiaru temperatury zwłok w wyraźnym odstępie czasowym bez ich przemieszczania oraz założenie, że temperatura otoczenia od chwili śmierci do zakończenia pomiarów jest niezmienna. Kiedy w 1965 roku James i Knight [38] zweryfikowali ową metodę na badanych przez siebie przypadkach, nie stwierdzili jej przewagi nad metodami opierającymi się na funkcji dwuwykładniczej.

W 1958 roku Sellier [64] przedstawił oryginalne podejście do opisu spadku temperatury zwłok. Zastosował bowiem w tym celu termodynamiczny model nieskończonego cylindra jako teoretyczny model ciała ludzkiego. Do obliczeń matematycznych Sellier wykorzystał dane uzyskane przez De Sarama i in. [15]. Udowodnił matematycznie, że promień ciała jest najważniejszym elementem charakteryzującym krzywe stygnięcia, natomiast czynniki dodatkowe, jak odzież i przykrycie ciała, są mniej znaczące. Sellier obserwował także spowolnienie stygnięcia ciała w początkowym okresie po śmierci. Dowodził, że nie jest to skutek właściwości termoizolujących tkanki tłuszczowej, lecz tego, że powoduje ona zwiększenie objętości i, co za tym idzie, promienia ciała (cylindra). Funkcja opisująca ten model umożliwia określenie gradientu temperatury oraz wpływu warunków krańcowych stygnięcia. Z drugiej strony sam autor uważał, że jego model może okazać się zbyt skomplikowany, aby mógł zostać wykorzystywany w powszechnej praktyce.

Jak widać, przedstawione powyżej dokonania w dziedzinie ustalenia czasu śmierci wynikające z analizy procesu stygnięcia zwłok były jedynie częściowym osiągnięciem, a w niektórych przypadkach stanowiły nawet krok wstecz.

Istotny postęp nastąpił dopiero w 1962 roku, tj. po około 100 latach od opracowania przez Rainy'ego modelu uwzględniającego newtonowskie prawo stygnięcia. Wtedy to Marshall i Hoare [49] zaproponowali model dwuwykładniczy, wykazując, że ciało w pierwszych 12 h po śmierci nie stygnie zgodnie z prawem Newtona, lecz nieco wolniej. Przebieg krzywej spadku temperatury miał charakter sigmoidalny. Przyczyn wolniejszego spadku temperatury w początkowym okresie po śmierci badacze ci upatrywali w pośmiertnym metabolizmie i produkcji ciepła oraz we wpływie powierzchniowych tkanek ciała o ograniczonej przewodności cieplnej. Marshall i Hoare w dalszych rozważaniach wykazali, że opracowany przez nich model dwuwykładniczy może być stosowany również dla osób ubranych, jednak wszelkie czynności przy zwłokach, jak ich przewracanie czy przenoszenie, mogą przyczynić się do zwiększenia błędów w ocenie czasu śmierci. Podsumowując swoje ówczesne badania, Marshall [48] stwierdził, że „ocena czasu śmierci na podstawie pomiaru temperatury zwłok nigdy nie będzie niczym więcej niż tylko przybliżeniem”.

Jak wspomniano wcześniej, pierwszym autorem, który użył sformułowania *plateau* pośmiertnego spadku temperatury i zagadnieniu temu poświęcił publikację, był Shapiro [66]. W swojej pracy podkreślał, że każda metoda oceny czasu śmierci musi uwzględniać początkowy wolniejszy spadek temperatury ciała.

W roku 1974 Brown i Marshall [10] wykazali, że zastosowanie więcej niż dwóch członów wykładniczych jedynie komplikowało model, nie dając bardziej precyzyjnych rezultatów. Stosując natomiast model dwuwykładniczy, można było indywidualnie określać czas zgonu, wykonując jeden tylko pomiar temperatury w odbyticy i uwzględniając proporcje ciała oraz temperaturę otoczenia w wystandaryzowanych warunkach stygnięcia. Wzór opisujący model dwuwykładniczy zaczęto wykorzystywać dopiero w końcu lat 80. XX wieku, kiedy Henssge [29] poddał go pewnej modyfikacji. Mianowicie zaprezentował on uproszczoną metodę ustalania newtonowskiego współczynnika stygnięcia i ustalił statystyczne wartości odchylenia pomiędzy wyliczonym a faktycznym czasem zgonu dla procesu stygnięcia w wystandaryzowanych warunkach. Dzięki badaniom procesu stygnięcia ciała przeprowadzonym na dużej liczbie zwłok ludzkich oraz na imitujących ciało ludzkie specjalnie opracowanych fantomach wypełnionych substancją żelową, Henssge i współpracownicy rozszerzyli zakres zastosowania metody do różnych warunków stygnięcia, wykorzystując empiryczne mnożniki poprawkowe dla masy ciała, różnego ubioru i warunków, w jakich przebywały zwłoki. Opracowali także do dziś stosowane w praktyce przez medyków sądowych nomogramy umożliwiające łatwe odczytywanie, a nie wyliczanie, czasu zgonu [29, 31, 33]. Do odczytywania czasu zgonu służy również program komputerowy stworzony na podstawie opracowania Henssgego i in. [36].

W dalszych badaniach zakres zastosowania metody „nomogramowej” rozszerzono do różnych warunków stygnięcia, np. dla zwłok pływających w wodzie [24] czy podlegających nagłym zmianom temperatury otoczenia [3]. Dla powyższych warunków na nomogramie zaznaczono także możliwe odchylenia między czasem odczytanym a faktycznym czasem zgonu.

Opracowane przez Henssgego i in. [28] fantomy znalazły także zastosowanie w odtwarzaniu przebiegu stygnięcia zwłok w dowolnych warunkach, również w miejscu, w którym dane zwłoki znaleziono. Przeprowadzone badania weryfikujące z wykorzystaniem fantomów i zwłok ludzkich uwiarygodniły metodę „nomogramową”, która jest po dzień dzisiejszy uznawana za wiodącą metodę, służącą do określania czasu zgonu we wczesnym okresie pośmiertnym [29, 31, 41].

W latach 80. XX wieku ustalaniem czasu śmierci na podstawie pomiaru temperatury ciała zajmował się Hiraiwa [34]. Rozwinął on wysuniętą w latach 50. przez Selliera [64] koncepcję modelu stygnięcia zakładającego, że

ciało ludzkie jest nieskończenie długim cylindrem. Hiraiwa opierał się na pomiarach temperatury w odbyticy. Szacował, że błąd jego metody wynosi poniżej 1 h, a w celu ułatwienia odczytu czasu, w jakim nastąpił zgon, opracował odpowiedni program komputerowy. Niestety, Hiraiwa [34] nie uniknął pewnych uproszczeń, w rzeczywistości mogących znacznie zwiększać deklarowany błąd oceny czasu zgonu.

W 1985 roku Green i Wright [22] opublikowali pracę, w której opisali metodę określania czasu zgonu bez konieczności używania parametrów odnoszących się do masy ciała. Zaproponowana przez nich technika polega na dwukrotnym pomiarze temperatury w odbyciu w odstępie 1 h oraz na pomiarze temperatury otoczenia. Czas, jaki upłynął od śmierci, był wyliczany na podstawie wartości współczynnika odczytywanego z opracowanego przez autorów wykresu przedstawiającego teoretyczną krzywą stygnięcia ciała.

Podjęmowano także próby wykorzystania innych miejsc do pomiarów temperatury ciała. I tak miejscem pozwalającym na stosunkowo precyzyjną ocenę czasu śmierci, zwłaszcza w pierwszych 6 h po śmierci (z dokładnością $\pm 1,5$ h), okazał się mózg [9, 23, 26]. Brinkmann, Henssge i ich współpracownicy opracowali dla mózgu nomogram umożliwiający, na tej samej zasadzie jak przy nomogramie dla temperatury w odbyciu, łatwe odczytanie czasu, jaki upłynął od chwili zgonu. Korzystnym czynnikiem w przypadku mózgu jest brak wpływu masy ciała na jego temperaturę. Natomiast błąd oszacowania czasu śmierci może zwiększać się ze względu na różną ilość włosów czy rodzaj nakrycia głowy, wpływające na izolację termiczną mózgu. Czynnikiem niewątpliwie utrudniającym zastosowanie pomiarów temperatury mózgu jest konieczność wprowadzenia sondy pomiarowej w głąb jamy czaszki.

W latach 90. XX wieku Baccino i in. [4] przeprowadzili serię eksperymentów wykorzystujących pomiar temperatury ucha zewnętrznego. Temperatura była mierzona i monitorowana za pomocą sondy wprowadzonej do ucha, której końcówka przylegała do błony bębenkowej. Nie obserwowano przy tym plateau pośmiertnego spadku temperatury. Zaproponowana metoda mogła być stosowana dla temperatury otoczenia między 16°C a 23°C. Według autorów, wyniki cechowały się dokładnością podobną do metody „nomogramowej” Henssgego, a w początkowym okresie po śmierci dokładność ich metody była nawet większa. Dodatkowo ważnym czynnikiem przemawiającym na jej korzyść była możliwość stosowania jej jako metody alternatywnej przy podejrzeniu seksualnego podłoża zbrodni (pomiaru nie dokonywano w odbyciu).

Na uwagę zasługuje istotny wkład badaczy polskich w badania nad pośmiertnym spadkiem temperatury zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. W połowie lat 80. XX wieku Miścicka-Śliwka i Śliwka opublikowali

cykl prac [50, 51, 52, 53, 54, 70], w których opisali oni własne badania nad przydatnością pomiarów temperatury zwłok w kilku miejscach ciała dla oceny czasu śmierci. Z badań tych wynika, że najlepszym miejscem pomiarowym jest serce. Miścicka-Śliwka i Śliwka opracowali nomogram pozwalający odczytać czas zgonu na podstawie pomiaru temperatury w sercu przy uwzględnieniu obwodu klatki piersiowej. Stwierdzili ponadto, odnotowaną także przez uczonych niemieckich [9, 23, 26], przydatność temperatury mierzonej w mózgu i jej wysoką korelację z czasem śmierci.

Omawiając ostatnie badania nad pomiarem temperatury zwłok mającej służyć ocenie czasu zgonu, należy wspomnieć metodę proponowaną przez Al-Alousiego i in. [1, 2], polegającą na pomiarze za pomocą termografii mikrofalowej temperatury w trzech miejscach ciała: w mózgu, wątrobie i odbyciu. Na podstawie swoich badań autorzy ci skonstruowali krzywe średniego przebiegu stygnięcia podanych miejsc, odrębnie dla ciała nagiego i osłoniętego, oraz opracowali trójwykładnicze równanie wykorzystujące dane z przeprowadzonych pomiarów trójmiejscowych. Metoda ta wymaga jednak znajomości temperatury podanych narządów w chwili śmierci, a niedokładność w tym względzie prowadzi do dużych błędów w ocenie czasu śmierci [41].

Niedawne badania Mall i in. [47] były próbą określenia czasu śmierci przy jedynie częściowo znanych warunkach, w jakich znajdowały się zwłoki. W ocenie czasu zgonu miało pomagać ciągle, trwające do kilku godzin, monitorowanie temperatury ciała w celu ustalenia szybkości jej spadku. Na tej podstawie miałyby być ustalane warunki otoczenia, a następnie czas zgonu.

W 2005 r. ukazała się praca Kaliszana i in. [39], opisująca pomiary temperatury w gałce ocznej i tkankach miękkich oczodołu w celu określania czasu, jaki upłynął od chwili zgonu. Badania były prowadzone na zwierzętach (świnie), jako że ich gałka oczna pod względem anatomii i fizjologii najbardziej odpowiada ludzkiej. Wyniki badań potwierdzają zasadność wykorzystania gałki ocznej, jak też tkanek miękkich oczodołu, jako punktów pomiaru temperatury we wczesnej fazie po śmierci. Na podstawie własnych badań Kaliszana i in. stwierdzili, iż w przypadku stygnięcia gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu nie występuje zjawisko *plateau*, czyli wolniejszego spadku temperatury w początkowej fazie po śmierci. Dzięki temu zastosowanie równania jednowykładniczego do opisu spadku temperatury gałki ocznej w czasie zapewnia uzyskanie najbardziej precyzyjnego oszacowania czasu zgonu w okresie do 13 h po śmierci. W przypadku tkanek miękkich oczodołu precyzja oszacowania czasu zgonu przewyższa pomiary w mięśniach i odbyticy do 10,5 h po śmierci. Z kolei, w późniejszym okresie, lepsze oszacowanie czasu zgonu zapewniają dane z pomiarów temperatury w mięśniach lub odbyticy.

W dalszych badaniach [40] Kaliszan potwierdził brak istnienia fazy *plateau* spadku temperatury w przypadku stygnięcia gałek ocznych i tkanek oczodołu, wprowadził równanie dwuwykładnicze pozwalające jeszcze precyzyjniej określić czas śmierci w pierwszych godzinach po śmierci, a także wykazał, że niewielki przepływ powietrza w pomieszczeniu, gdzie znajdują się zwłoki (wiatr do 2 stopni w skali Beauforta), nie wpływa istotnie na szybkość chłodzenia zwłok, zaś czynnikiem istotnym w takich warunkach jest temperatura otoczenia.

Na podstawie własnych badań Kaliszan i in. [39, 40] stwierdzili, że wprowadzenie opracowanej na zwierzętach doświadczalnych metody określania czasu zgonu na podstawie pomiaru temperatury gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołów do praktyki medyczno-sądowej u ludzi jest uzasadnione, aczkolwiek wymaga przeprowadzenia eksperymentów weryfikujących według metodyki opracowanej na zwłokach ludzkich.

4. Metody łączące pomiar temperatury zwłok z obserwacją zmian pośmiertnych

Niektórzy autorzy zalecają określanie czasu zgonu przy jednoczesnym użyciu kilku metod. Dokonuje się zarówno pomiaru temperatury ciała w więcej niż jednym miejscu (np. w odbycie i mózgu) [25], jak i łączy się pomiar temperatury ciała z innymi metodami szacowania czasu zgonu [27, 35] lub stosuje się kilka metod niezależnych od pomiaru temperatury ciała [30, 32]. Według Henssgego i Madei [33], zwłaszcza metoda łącząca pomiar temperatury zwłok z oceną wysycenia płam opadowych, stopnia rozwoju stężenia pośmiertnego, reakcji mięśni szkieletowych na bodziec elektryczny i mechaniczny oraz farmakologicznej pobudliwości tęczówki oka wykazała się większą wiarygodnością i bardziej precyzyjnym zawężeniem oszacowanego czasu śmierci aniżeli jakakolwiek z dotychczas opisywanych metod. W pewnych sytuacjach określony metodą pomiaru temperatury zarówno dolny, jak i górny limit czasu śmierci może być zawężony przez uwzględnienie jednego lub więcej dodatkowych parametrów.