

## МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНИ ЖИВОТНЫХ

© 2019 г. Н.Л. Векшин, М.С. Фролова

Институт биофизики клетки РАН, 142290, Пущино Московской области, ул. Институтская, 3

E-mail: nvekshin@rambler.ru

Поступила в редакцию 30.11.17 г.

После доработки 17.09.18 г.

Принято к публикации 29.10.18 г.

Предлагается многопараметрическая формула, позволяющая достаточно точно описать среднюю естественную продолжительность жизни позвоночных животных разных видов, включая общеизвестные «выпадающие» случаи (голый землекоп, летучие мыши и др.). Формула учитывает массу тела и мозга, продолжительность пубертатного периода, сна и гибернации, калорийность суточного рациона, потребление кислорода, а также температуру тела. Делается заключение, что старение есть результат повреждений белков и ДНК в ходе жизнедеятельности, но не генетическая программа фенотоза.

*Ключевые слова:* продолжительность жизни, старение, животные-долгожители, фенотоз.

DOI: 10.1134/S0006302919010198

Каждому виду животных свойственна своя средняя естественная (без учета детской смертности, инфекций и др.) продолжительность жизни (ПЖ). Различия между отдельными особями внутри вида обычно не слишком велики. Например, крысы живут в среднем три года, хотя в хороших условиях встречаются прожившие пять лет, но не бывает пятнадцатилетних. Поэтому некоторые исследователи предполагают генетическую запрограммированность ПЖ [1–3].

Хотя старение можно регулировать через гены, влияя на сигнальные пути или транскрипционные факторы [4–10], но никаких специальных «генов смерти» до сих пор не найдено. Очевидно, что существует регулирование, которое зависит от изменений в экспрессии генов, влияющие на системы поддержания репарации и защитные ответы. Например, возникновение межбелковых сшивок при старении клетки может быть связано со слабой активностью антиоксидантных ферментов, число копий которых ограничено на генетическом уровне. Межвидовые различия ДНК слишком малы, чтобы привести к сильному различию в сроках жизни. Например, как известно, последовательность нуклеотидов ДНК человека совпадает с ДНК обезьян на 98% и с ДНК свиней на 90%, т.е.

можно было бы ожидать одинаковой величины ПЖ, однако человек живет в несколько раз дольше.

Давно замечено, что крупные животные обычно живут дольше мелких, например, средняя ПЖ некоторых млекопитающих примерно следующая: мыши – 2 года [11], собаки – 20 лет [12], лошади – 37 лет [13], слоны – 65 лет [14]. Это принято объяснять, в частности, тем, что обмен веществ связан с дыханием и тепловым балансом, зависящим от размеров тела и его поверхности. Ведь для поддержания температуры тела мелкому животному нужно иметь более высокий уровень обмена веществ [15]. А это может приводить к более быстрому накоплению внутриклеточных дефектов. Не случайно отмечалась обратная зависимость между интенсивностью обмена и величиной ПЖ [16,17].

Существует также вторая закономерность: обычно дольше живут те животные, у которых крупнее головной мозг [1,18]. Чем меньше мозг, тем вероятнее, что старческие дефекты будут сильнее ухудшать его гормональный и электрофизиологический контроль над телом. Или, возможно, чем меньше мозг, тем вообще меньше его роль в контроле над телом. При этом внутри вида может наблюдаться обратная ситуация, например женщины живут дольше мужчин, имея меньший по объему мозг.

Сокращения: ПЖ – продолжительность жизни, ММ – масса мозга, МТ – масса тела, МПК – максимальное потребление кислорода.

Зависимость ПЖ млекопитающих от массы мозга (ММ) и массы тела (МТ) принято описывать при помощи эмпирических уравнений такого типа [18]:

$$\lg ПЖ = 0,6 \lg ММ - 0,23 \lg МТ + 0,99. \quad (1)$$

При  $ММ < 1$  и при  $МТ < 1$  величина логарифма принимает отрицательные значения, вследствие этого два члена уравнения меняют знак, что трудно интерпретировать.

Уравнение (1), подобранное для определенных видов млекопитающих в логарифмическом масштабе, описывает ПЖ с низкой точностью. У птиц, рептилий и амфибий соответствие между МТ и ПЖ часто не выполняется [19]. Малопригодность уравнений типа (1) обусловлена тем, что они не учитывают множества реальных факторов, сильно влияющих на ПЖ.

Количество исключений, выпадающих из уравнения (1), слишком велико. Например, многие мелкие грызуны живут очень мало из-за интенсивного обмена веществ [19]. Это означает, что в уравнении для ПЖ должна фигурировать величина, характеризующая интенсивность обмена. Поскольку основная доля энергетического обмена у животных приходится на аэробные реакции [20], то для расчетов можно было бы использовать максимальное потребление кислорода (МПК).

Представитель отряда грызунов голый землекоп живет, наоборот, необычайно долго (17–35 лет) и имеет особую биохимию, обеспечивающую резистентность к образованию раковых опухолей [20,21]. У него имеется повышенная способность устранять накапливающиеся дефекты [22,23], а гены теломеразы экспрессируются в течение всей жизни [24]. Помимо этих факторов, у голого землекопа замедленный метаболизм и низкокалорийный рацион и, как следствие, низок уровень глюкозы в крови. Кроме того, он живет под землей в атмосфере с пониженным содержанием кислорода и, в отличие от других млекопитающих, не контролирует температуру своего тела [25]. Таким образом, помимо особой генетики, вполне достаточно других факторов, которые увеличивают его ПЖ.

Другой пример – летучие мыши, например *Myotis myotis*. Они живут от двадцати до сорока лет вместо двух–трех лет у обычных мышей. Летучие мыши бодрствуют всего около трех–четырёх месяцев, а остальные восемь–девять месяцев спят, впадая практически в анабиоз, при котором температура тела падает до двух–четырёх градусов. При этом резко замедляется дыхание и все жизненные процессы [26].

Известно также, что животные, не имеющие постоянной температуры тела, в прохладном климате живут дольше, чем в жарком. Например, усонogie рачки у побережья Англии живут пять–шесть лет, а в холодном Баренцевом море – 40 лет [27].

Из приведенных примеров следует, что в формуле для расчета ПЖ должны фигурировать также температура тела и продолжительность сна или анабиоза.

Если говорить о молекулярных механизмах старения, то речь должна идти о денатурации белков, межбелковых сшивках и повреждении функциональных участков ДНК. Например, старение нематод вызвано прежде всего образованием сшивок между денатурированными белками [28]. Старение клеток печени крысы также обусловлено прежде всего межбелковыми сшивками в митохондриях с образованием пигмента старения липофусцина [29]. Старение дрозофил, как известно, в значительной степени связано с большим мутационным грузом ДНК [17].

Процесс спонтанного образования дефектов в белках или ДНК, может быть описан уравнением [30]:

$$\tau = \nu^{-1} \exp(E/kT), \quad (2)$$

где  $\tau$  – время образования дефектов (для белков – время денатурации, за которое число нативных молекул снижается в  $e$  раз),  $E$  – энергия активации дефекта (например, энергия разрыва дисульфидных связей в белке),  $k$  – константа Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $\nu$  – частота колебаний атомов ( $\sim 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ). Время  $\tau$  является количественной характеристикой «молекулярного старения» – неустойчивости данного белка или расплетенного участка ДНК при заданных условиях. Например, для спонтанно агрегирующего  $\alpha$ -кристаллина, ответственного за возникновение старческой катаракты (помутнение хрусталика глаза), в растворе при концентрации 0,8 мг/мл, температуре 70°C и pH 8,4 величина  $\tau$  составляет  $\sim 100$  ч, а при 36°C – около года [30]. Температура денатурации белков при нагреве обычно находится между 45 и 70°C. Однако разрыв дисульфидных связей, обеспечивающих третичную структуру белков, наступает еще раньше, при 42°C [31,32]. Хотя двойная спираль ДНК довольно устойчива к денатурации (температура плавления свыше 90°C), расплетенные участки начинают плавиться уже при 42°C [30,33]. Вот почему в формуле для ПЖ должна фигурировать температура 42°C.



**Рис. 1.** Основные положительные и отрицательные факторы, удлиняющие или укорачивающие жизнь животных.

Итак, на ПЖ влияет (положительно или отрицательно) целый набор важных факторов (рис. 1). Для расчета ПЖ позвоночных животных мы предлагаем следующую многопараметрическую эмпирическую формулу:

$$ПЖ = \frac{MT}{KK} + MM^{1/2} + ПП + 0,25ПС + \quad (3) \\ + СП - 1,5МПК^{1/3} + 42 - TT,$$

где *ПЖ* – продолжительность жизни в годах (без учета гибели от хищников, инфекций и нестарческих болезней), *MT* – масса тела в граммах, *KK* – количество килокалорий в пище за сутки, *MM* – масса мозга в граммах, *ПП* – пубертатный период в годах (детеныши не стареют), *ПС* – продолжительность сна в часах за сутки (во сне снижается метаболизм, тело стареет медленней), *СП* – спячка или анабиоз в месяцах за год (температура сильно падает и поэтому организм почти не стареет), *МПК* – максимальное потребление кислорода (мл/кг/мин), *TT* – температура тела (градусов Цельсия), 42 градуса – температура разрыва дисульфидных связей в белках и начала плавления расплетенных участков ДНК. В формуле все коэффициенты и степени подобраны эмпирически.

Параметры формулы частично связаны между собой. Например, большой мозг чаще (но не всегда) встречается у крупных животных. Пубертатный период у крупных животных обычно длиннее, чем у мелких. Количество потребляемой пищи на вес тела обычно уменьшается с увеличением размера животного.

Потомки старых матерей живут меньше молодых [34,35]; это доказано, например, для мучного хрущака, комнатной мухи, дрозофилы, коловратки и других [36]. Если давать возможность размножаться только старым самкам, то ПЖ каждого следующего поколения укорачивается настолько, что животные погибают, не успев оставить потомства. Причиной укороче-

ния ПЖ потомства старых самок является накопление груза мутаций в материнской ДНК [37] (особенно – в митохондриальной ДНК). Значит, в формуле в принципе мог бы быть член, учитывающий груз мутаций или хотя бы процент старых самок в популяции. Но для большинства видов он, к сожалению, не определен.

Известно, что в силу различных причин у многих животных самки живут дольше самцов. Половой фактор обычно влияет на ПЖ не более чем на 10%. В формулу мы его не ввели.

Предложенная многопараметрическая формула учитывает почти все общеизвестные важные *природные* факторы, существенно влияющие на естественную ПЖ. Зависимость ПЖ от массы мозга и МПК в формуле менее резкая, чем от остальных факторов. Например, величина ММ учитывается как квадратный корень, так как решающим фактором является, по-видимому, площадь мозговой коры, а не объем всего мозга.

Первоначально мы создавали модель для расчета продолжительности жизни млекопитающих и для них подбирали коэффициенты. Затем оказалось, что эта модель описывает продолжительность жизни животных из других групп позвоночных – пресмыкающихся (кожистая черепаха), рыб (золотая рыбка), птиц (гусь домашний, колибри-пчелка).

Все параметры формулы (3) при расчетах берутся безразмерными. Полученной безразмерной ПЖ присваивается размерность в годах. В таблице приведены величины ПЖ разных видов животных, рассчитанные нами по многопараметрической формуле.

Данные по реальной ПЖ частично взяты из The Animal Ageing & Longevity Database [38] и работ [25,32,35,39–45]. Цифры, отмеченные звездочкой (\*), взяты не из литературы (данные не найдены), а приняты по аналогии. Например, МПК синего кита (*Balaenoptera musculus*) и кожистой черепахи (*Dermodochelys coriacea*) мы произвольно взяли как МПК у дельфина афалины (*Tursiops truncatus*).

Калорийность суточного рациона питания рассчитывали из веса пищи и ее пищевой ценности. Например, синий кит (*Balaenoptera musculus*) съедает в среднем 7000 кг криля (рачков) в день, пищевая ценность которых 97 ккал/100 грамм, а значит, потребляет 6790000 ккал в день.

У мелкой птички колибри *Mellisuga helenae* (колибри-пчелка) температура во время сна снижается зачастую до 16°C, и птичка впадает в оцепенение, близкое к анабиозу [46]. Поэтому мы принимаем, что она не спит (*ПС* = 0), но

Расчет продолжительности жизни по формуле (3)

Организм	Латинское название	МТ, г	ММ, г	ПП, лет	ПС, ч	КК, ккал/день	СП, мес	ТТ, °С	МПК, мл/кг/мин	ПЖ по формуле	Реальная ПЖ, лет
Человек	<i>Homo sapiens sapiens</i>	72000	1400	14	8	2500	0	37	45	81,9	75
Крыса серая	<i>Rattus norvegicus</i>	250	2	0,1	12	130	0	38	80	4,0	3
Слон азиатский	<i>Elephas maximus</i>	3178000	4603	9	5	500000	0	37	200	80,7	65,5
Летучая мышь	<i>Myotis myotis</i>	28	0,875	1,3	20	36	7	23**	77	27,6	18
Голый землекоп	<i>Heterocephalus glaber</i>	38	0,376	1	12	4	0	20	12	32,7	30
Кожистая черепаха	<i>Dermochelys coriacea</i>	420000	420	6	11	657000	0	25,5	25*	42	50
Дельфин афалина	<i>Tursiops truncatus</i>	200000	1700	5,5	8	39000	0	37	25	54,5	60
Синий кит	<i>Balaenoptera musculus</i>	150000000	8000	5	8	6790000	0	37,5	25*	118,6	110
Колибри-пчелка	<i>Mellisuga helenae</i>	3	0,17	1	0	2,24	4	32**	80	10,3	7
Гусь домашний	<i>Anser anser</i>	10000	50	1	10	900	0	40	30	19,0	25
Лошадь домашняя	<i>Equus ferus caballus</i>	300000	500	3	4	30000	0	38	180	31,9	37,5
Собака домашняя	<i>Canis familiaris</i>	20000	60	1,4	13	3960				13,5	20
Золотая рыбка	<i>Carassius auratus</i>	200	0,097	1	12	9,2				36,4	41
Мышь домовая	<i>Mus musculus</i>	20	0,4	0,125	12	20				2,0	2

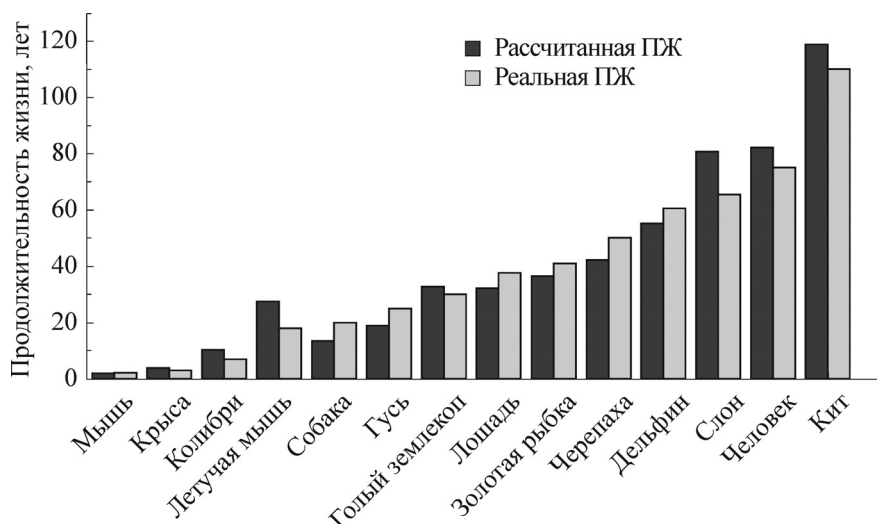
Примечание. МТ – масса тела; ММ – масса мозга; ПП – пубертатный период; ПС – продолжительность сна; КК – количество килокалорий в пище за сутки; СП – спячка или анабиоз в месяцах за год; ТТ – температура тела; МПК – максимальное потребление кислорода; \* – значение не из литературных данных, а принятое по аналогии, как МПК у дельфина; \*\* – среднегодовая температура тела (объяснение в тексте).

зато анабиозная спячка  $СП = 4$  месяца в году [47].

Температура тела гибернарующих животных была рассчитана нами как среднегодовая, например, колибри треть года имеет температуру тела около 18°C, а две трети – около 40°C, значит, среднегодовая температура 23°C. Летучие мыши, например *Myotis myotis*, проводят в анабиозе семь месяцев в году при температуре не больше 12°C, а остальную часть времени при температуре около 40°C, значит, среднегодовая температура 23°C.

Если построить график-гистограмму (рис. 2), то видно хорошее соответствие между рассчитанными и реальными значениями ПЖ позвоночных животных разных видов. Это означает, что никакой «особой биохимии» или «специальных генов старения», кардинально продлевающих или укорачивающих жизнь, нет ни у одного из упомянутых животных.

Предложенная нами феноменологическая многопараметрическая формула согласуется с существующими теориями старения. По теории износа [48] клетки и ткани имеют жизненно важные части, которые неизбежно изнашиваются со временем (фактор времени). В теории



**Рис. 2.** Гистограмма рассчитанной (темные столбцы) и реальной (светлые столбцы) средней продолжительности жизни позвоночных животных разных видов.

скорости жизни, чем больше скорость метаболизма кислорода в организме, тем короче ПЖ [49]. В нашей формуле это учитывается через МПК. Согласно теории поперечных сшивок, накопление сшитых белков ухудшает работу клетки. При большей температуре скорость накопления поперечных сшивок выше. По свободно-радикальной теории, основной причиной старения являются свободные радикалы [50]. Перекисное окисление липидов приводит к накоплению липофусцина – мусора, который ухудшает работу клетки. У растущих организмов (в нашей формуле это учтено через продолжительность пубертатного периода) липофусцин при делении клеток выбрасывается [51], а у взрослых – накапливается. Также важна калорийность и состав потребляемой пищи: при ограничительной диете образуется меньше мусора, что увеличивает ПЖ [52,53]. По радиационной теории старения ионизирующее излучение может повреждать клетки прямо или косвенно через образование свободных радикалов. Повреждаются белки и ДНК [54]. Часть этих повреждений исправляется, но некоторые накапливаются. Генетические мутации приводят к дисфункции организма и старению. Отметим, что большой размер тела и мозга частично защищает организм от проникновения ионизирующей радиации внутрь.

В заключение нужно еще раз подчеркнуть, что предложенная многопараметрическая формула является чисто эмпирической и не имеет физического смысла. Характерной особенностью подобных *безразмерных* формул, выражающих эмпирические закономерности, является наличие коэффициентов – произвольных

параметров формулы, численные значения которых подбираются для более точного совпадения расчетов с экспериментальными данными [55]. Хотя такой подход не устанавливает причинно-следственных связей между параметрами формулы, он позволяет количественно описывать имеющийся массив экспериментальных данных и даже обладает некоторой предсказательной силой для сходных объектов.

## ВЫВОДЫ

1. Многопараметрическая формула позволяет достаточно точно описать среднюю естественную продолжительность жизни позвоночных животных разных видов.

2. Общеизвестные «выпадающие» случаи (голый землекоп, летучая мышь и другие) на самом деле не являются выпадающими.

3. Старение есть результат накопления внутриклеточных повреждений белков и ДНК, а не выполнение «генетической программы».

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации № СП-2027.2015.4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Comfort, *Gerontologia* **16**, 48 (1970).
2. N. Mori and M. Mori, *Acta Med. Nagasaki* **56**, 73 (2011).
3. V. P. Skulachev, *Mol. Aspects Med.* **20** (3), 139 (1999).
4. V. N. Anisimov, L. M. Berstein, P. A. Egormin, et al., *Cell Cycle* **7**, 2769 (2008).
5. O. Arum, M. S. Bonkowski, J. S. Rocha, and A. Bartke, *Aging Cell* **8**, 756 (2009).

6. D. E. Harrison, R. Strong, Z. D. Sharp, et al., *Nature* **460**, 392 (2009).
7. T. Heidler, K. Hartwig, H. Daniel, and U. Wenzel, *Biogerontology* **11** (2), 183 (2010).
8. M. Kaeberlein and B.K. Kennedy, *Nature* **460**, 360 (2009).
9. C. Kenyon, *Cell* **120**, 449 (2005).
10. S. Shama, C. Y. Lai, J. M. Antoniazzi, et al., *Exp. Cell Res.* **245**, 379 (1998).
11. А. Э. Брэм, *Жизнь животных*. Том I. *Млекопитающие* (Слово, Москва, 1992).
12. G. Spadafori and M. Becker, *Dogs for Dummies* (IDG Books, 1996).
13. M. E. Ensminger, *Horses and Horsemanship: Animal Agricultural Series* (IN: Interstate Publishers, Danville, 1990).
14. R. Sukumar, *The Living Elephants: Evolutionary Ecology, Behavior, and Conservation* (Oxford University Press, 2003).
15. J. Ralph, N. Berger, and H. Phillips, *Clinical Physiology of Sleep*. American Physiological Society 171 (1988).
16. Q. P. Fitzgibbon, C. J. Simon, G. G. Smith, et al., *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol Integr Physiol.* **207** (5), 13 (2017).
17. J. Miquel, P. R. Lundgren, K. G. Bensch, and H. Atlan, *Mech. Ageing Dev.* **5** (5), 347 (1976).
18. M. A. Hofman, *Q Rev Biol.* **8** (4), 495 (1983).
19. J. P. Magalhaes and J. A. Costa, *J. Evol. Biol.* **22** (8), 1770 (2009).
20. R. Buffenstein and J. U. Jarvis, *Sci. Aging Knowledge Environ.* **2002** (21), 7 (2002).
21. X. Tian, J. Azpurua, C. Hine, et al., *Nature* **499**, 346 (2013).
22. J. Azpurua, Z. Ke, I. X. Chen, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110**, 17350 (2013).
23. K. N. Lewis, E. Wason, Y. H. Edrey, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **112** 3722 (2015).
24. S. A. Evfratov, E. M. Smekalova, A. V. Golovin, et al., *Acta Naturae* **6** (2), 41 (2014).
25. B. D. Goldmana, S. L. Goldmana, T. Lanza, et al., *Physiology & Behavior* **66** (3), 447 (1999).
26. G. S. Wilkinson and J. M. South, *Aging Cell* **1** (2), 124 (2002).
27. F. Ruiz, M. Abad, A. M. Bodergat, et al., *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **10**, 1115 (2013).
28. Е. Л. Гагаринский и Н. Л. Векшин, *Успехи геронтологии* **30** (5), (2017).
29. М. С. Фролова, А. М. Сурич, А. В. Браславский и Н. Л. Векшин, *Биофизика* **60** (5), 1125 (2015).
30. Н. Л. Векшин, *Флуоресцентная спектроскопия биополимеров* (Фотон-век, Пушино, 2008).
31. J. Miquel, P. R. Lundgren, K. G. Bensch, and H. Atlan, *Mech. Ageing Dev.* **5** (5), 347 (1976).
32. M. E. Orr, V. R. Garbarino, A. Salinas, and R. Buffenstein, *Front. Neurosci.* **10**, 504 (2016).
33. C. M. Johnson, *Arch. Biochem. Biophys.* **531**, 100 (2013).
34. L. A. Gavrilov and N. S. Gavrilova, *Sex and Longevity: Sexuality, Gender, Reproduction, Parenthood* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000).
35. F. Pellestor, T. Anahory, and S. Hamamah, *Cytogenet. Genome Res.* **111** (3–4), 206 (2005).
36. C. E. Finch, *Longevity, Senescence, and the Genome* (University of Chicago Press, Chicago and London, 1990).
37. S. Salvioli, M. Capri, A. Santoro, et al., *Biotechnol J.* **3** (6), 740 (2008).
38. *AnAge: The Animal Ageing and Longevity Database*: <http://genomics.senescence.info/species/>.
39. A. Gorecki and Z. Kania, *Acta Theriologica* **31** (7), 97 (1986).
40. S. G. Heaslip, S. J. Iverson, W. D. Bowen, and M. C. James, *PLoS One* **7** (3), (2012).
41. A. Kurta, K. A. Johnson, and T. H. Kunz, *Physiol. Zool.* **60** (4), 386 (1987).
42. B. Rodrigues, D. M. Figueroa, C. T. Mostarda, et al., *Cardiovasc. Diabetol.* **6**, 38 (2007).
43. C. W. Sapsford and G. R. Hughes, *Zool. Africana* **13** (1), 63 (1978).
44. J. J. Storm and J. G. Boyles, *Acta Theriologica* **56** (2), 123 (2011).
45. T. M. Williams, W. A. Friedl, and J. E. Haun, *J. Exp. Biol.* **179**, 31 (1993).
46. K. Крґгер, R. Prinzing, and K. Schuchmann, *Comp. Biochem. Physiol. A: Physiology* **73**, 679 (1982).
47. J. L. Hargrove, *Nutr J.* **13** (4), 36 (2005).
48. J. Kunlin, *Aging Dis.* **1** (2), 72 (2010).
49. K. Brys, J. R. Vanfleteren, and B. P. Braeckman, *Exp. Gerontol.* **42** (9), 845 (2007).
50. D. Harman, *J. Gerontol.* **11** (3), 298 (1956).
51. D. A. Gray and J. Woulfe, *Sci. Aging Knowledge Environ.* **2005** (5), (2005).
52. S. Anton and C. Leeuwenburgh, *Exp. Gerontol.* **48** (10), 1003 (2013).
53. K. Opalach, S. Rangaraju, I. Madorsky, et al., *Rejuvenation Res.* **13** (1), 65 (2010).
54. L. Hernandez, M. Terradas, J. Camps, et al., *Aging Cell* **14** (2), 153 (2015).
55. Е. Львовский. *Статистические методы построения эмпирических формул. Учебное пособие* (Высш. шк., М., 1988).

## **Multiparametric Formula for Calculation of Animal Lifespan**

**N.L. Vekshin and M.S. Frolova**

*Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences,  
ul. Institutskaya 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

We propose a multiparametric formula for calculation of the average natural lifespan of various vertebrate species, including well-known mammals such as naked mole rat, bat, etc. This formula includes the following parameters: body mass and brain weight, the duration of puberty, sleep or hibernation, daily food intake, oxygen consumption and body temperature. We have concluded that aging is the result of protein and DNA damage during life cycles, but not a genetic program underlying phenoptosis.

*Keywords: lifespan, aging, long-lived animals, phenoptosis*