

МОДЕЛЬ ЭНЕРГОЗАТРАТ ЖИВОТНЫХ И КЛИМАТ

В. Ю. Мордовин*, В. В. Михайлов**

*Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крайнего Севера СО
РАСХН. 663302, Норильск, ул.Комсомольская, д.1
<mordovinvladimir@mail.ru>

**Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14-я линия ВО, д. 39
<mww@croquet.ru>

УДК 599.735

В. Ю. Мордовин, В. В. Михайлов. **Модель энергозатрат животных и климат** // Труды СПИИ-РАН, Вып. 2, т. 2. — СПб.: Наука, 2005.

Аннотация. Представлена модель для определения энергетических трат организма диких северных оленей, связанных с поддержанием термостабильности и активностью животных в зависимости от температуры воздуха, скорости ветра, состояния снежного покрова, солнечной радиации. Приводятся результаты расчетов в широком диапазоне изменения метеофакторов и оценки границ толерантности животных. — Библиограф. 22 назв.

UDC 599.735

V.J.Mordovin, V.V. Michailov. **Model of power expenditure of animals and climate** // SPIIRAS Proceedings. Issue 2, vol. 2. — SPb.: Nauka, 2005.

Abstract. The model for definition of power expenditure of wild reindeer connected to maintenance thermal stability and activity animal depending on temperature of air, speed of a wind, condition of a snow cover, solar radiation is submitted. The results of accounts in a wide range of climatic factors and estimation of borders of tolerance of animals are resulted. — Bibl. 22 items.

Введение

Погода и климат являются важным экосистемным фактором, который необходимо учитывать как в хозяйственном плане при оценке его влияния на продуктивные показатели животных [1,2], так и в научном плане, поскольку многие вопросы динамики полярных экосистем в связи с колебаниями климатической системы Земли остаются не изученными [3,4]. В тундре и полярной тайге колебания температуры воздуха достигают 100 °С, скорости ветра — до 40 м/сек, летом бывают заморозки и снег, а зимой — оттепели и гололед. В экстремальных климатических условиях у животных вырабатываются физиологические и поведенческие адаптации — мощный теплоизолирующий слой меха, накопление жировой ткани, обширные сезонные миграции с изменением спектров питания и т. п. Интегральным показателем влияния климата на состояние организма животных является величина энергозатрат. Пространственно-временное распределение энергозатрат в зависимости от значений актинометрических и метеофакторов образует биоклиматическое поле ареала популяции животных. Положение зон энергетического оптимума и пессимума поля вместе с другими факторами (ресурсами пищи, рельефом местности, антропогенным воздействием) оказывают влияние на сезонное размещение животных, характер миграций, их упитанность и смертность. Однако возможности прямого измерения энергозатрат животных для различных погодно-климатических условий весьма ограничены. В связи с этим нами была предпринята попытка построить математическую модель, связывающую величину энергозатрат с основными погодно-

климатическими факторами — температурой воздуха, скоростью ветра, солнечной радиацией, облачностью, состоянием снежного покрова.

В качестве объекта моделирования был выбран дикий северный олень как массовый, наиболее изученный и важный в экологическом и хозяйственном отношении компонент экосистем тундры и северной тайги, а в качестве конкретной популяции — крупнейшая в России таймырская популяция. Диких северных оленей. Численность популяции по авиаучету 2001 г. составила около 1 млн. особей. Регламентированный промысел диких северных оленей ведется с 1972 г. В период с 1972 по 2005 г. промысловые хозяйства Енисейского Севера изъяли из популяции более 1.9 млн. животных. Полученная мясная продукция превосходит продукцию оленеводческих хозяйств всей Средней и Западной Сибири. Аналогов столь крупномасштабного и эффективного использования ресурсов дикого северного оленя не было ни в других регионах России, ни за рубежом. Однако многие проблемы, связанные с изучением пространственной структуры популяции, сезонного размещения животных и их миграций не решены.

Разработка модели направлена на решение двух задач. Во-первых, для проведения машинных экспериментов по количественной оценке влияния метеофакторов на величину энергозатрат диких северных оленей, выявления неблагоприятного сочетания факторов, ведущих к переохлаждению или перегреву организма, снижению кормодобывающей активности и инициирующим миграционное поведение животных. Во-вторых — для построения биоклиматической модели ареала популяции и выявления мест обитания животных, более соответствующих им по климатическим условиям. Для решения этой задачи должны быть привлечены данные погодно-климатических и актинометрических наблюдений метеостанций и спутников.

Ниже приводятся основные уравнения модели энергозатрат дикого северного оленя. Их подробный вывод с обоснованием принятых допущений имеется в работах [5,6].

1. Модель энергозатрат

Модель энергозатрат животных основывается на уравнении для полной метаболической мощности Q животного, предложенного В. Г. Горшковым [7]. При суточном усреднении энергозатраты определяются уравнением:

$$\bar{Q}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T q \sum_{i=0}^3 a_i(t) dt = (\bar{a}_0(t) \sum_{i=0}^3 T_i + \sum_{j=1}^3 \bar{a}_j(t) T_j) q,$$

где a_0 — коэффициент готовности, a_1 — коэффициент рабочей мощности передвижения, a_2 — коэффициент рабочей мощности извлечения корма, a_3 — коэффициент рабочей мощности свободного выпаса, q — мощность основного обмена, T_i , T_j — суточный бюджет времени.

Рабочая мощность передвижения и добывания пищи $Q_m(t)$ рассчитывается с помощью уравнений:

$$\frac{q}{l^2} = \frac{\rho}{2} W_0^3; \quad l = \left(\frac{m}{\rho}\right)^{1/3}; \quad \alpha a_1(t)q = \gamma mgU + \frac{k}{2} \varphi dU^3 H(t);$$

$$\alpha a_2(t)q = m_1 g N v + S \varphi g H^2(t); \quad a_3(t)q = \xi = const; \quad Q_m(t) = \sum_{i=1}^3 a_i(t)q,$$

где t — время, q — основной обмен, l — размер животного, ρ — плотность тела, W_0 — базальная скорость, α — КПД перевода рабочей мощности организма в механическую, γ — коэффициент сопротивления твердого грунта, k — коэффициент сопротивления снега, g — ускорение силы тяжести, U — скорость перемещения животного, φ — плотность снега, H — высота снега, d — радиус контакта с вязким грунтом, m — масса животного, m_1 — масса конечности, N — потенциальная высота, v — число копательных движений, S — скорость образования кормовой площадки.

Базальная метаболическая скорость является универсальной константой, так как практически не зависит от размеров и систематического положения животного. Параметры γ , k , S — видоспецифичны, их идентификация для северного оленя проведена с использованием экспериментальных данных, полученных на стационаре RANGIFER [8] и материалов по изучению таймырской популяции диких северных оленей [9,10].

Коэффициент a_0 описывает энергообмен животного в состоянии покоя, связанный с теплоотдачей организма. Потери тепла в зимний период составляют 80-90% метаболизированной энергии и определяются, в основном, температурой воздуха и скоростью ветра, в летний период к этим факторам добавляются солнечная радиация и облачность. Для оценки теплоотдачи организма в состоянии покоя использовалась двухслойная модель «ядро-мех». В слое ядра выполняется баланс:

$$M + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 0,$$

где M — теплопродукция, Q_1 — радиационный баланс поверхности кожи, Q_2 — тепловой баланс на поверхности кожи, Q_3 — теплообмен при дыхании, Q_4 — потери тепла на испарение с поверхности кожи, Q_5 — потери тепла на нагревание пищи. Ввиду густоты мехового покрова, не пропускающего радиацию, $Q_1 = 0$, потери тепла на испарение зимой отсутствуют, $Q_4 = 0$. Затраты на нагревание пищи Q_5 могут быть оценены по водному балансу организма и средней температуре воздуха. Их величина составляет около 0.03 ккал/ч.кг. Потери тепла с дыханием регулируются путем изменения частоты и глубины дыхания, их можно принять не зависящими от температуры, $Q_3 \approx 0.3$ ккал/ч кг.

Для описания потока тепла к поверхности кожи можно использовать выражение [11]:

$$Q_2 = \frac{1}{\lambda} \int_{\Omega} (t_p - t_k) d\Omega,$$

где λ — коэффициент тканевой теплоизоляции, t_p , t_k — ректальная температура и температура поверхности кожи, Ω — область кожного покрова.

В слое меха процесс переноса тепла происходит в воздушной среде для описания которого используем одномерное уравнение теплопроводности:

$$w \frac{\partial T}{\partial Z} - K_0 \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = K_T \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{\rho_B C_B} \frac{\partial R_Z}{\partial Z},$$

где w — нормальная составляющая вектора скорости ветра, T — температура воздуха в $^{\circ}K$, K_0 — коэффициент молекулярной теплопроводности, K_m — коэф-

коэффициент турбулентной диффузии, R_z — вертикальная составляющая лучистого потока тепла, ρ_v, C_v — плотность и теплоемкость воздуха.

После интегрирования уравнения для слоя меха получим:

$$\int_0^h \rho_v C_v \left(w \frac{\partial T}{\partial z} - K_0 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz = \rho_v C_v \left(K_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_h - K_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_0 \right) + R_z \Big|_h - R_z \Big|_0,$$

где h — толщина меха.

Выражение в левой части уравнения определяет конвективные потери тепла. В связи с трудностью экспериментального определения составляющих конвективного потока, согласно [12] было принято более простое описание:

$$\int_0^h \rho_v C_v \left(w \frac{\partial T}{\partial z} - K_0 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \approx \frac{\varepsilon}{h} (t_k - t_b) - Q_0,$$

где ε — параметр, определяющий поток тепла при отсутствии ветра, Q_0 — конвективный поток на уровне кожи, t_b — температура воздуха. Первый член в правой части уравнения описывает продукцию турбулентного потока тепла Q_v в слое меха. Для коэффициента турбулентной диффузии был использован метод параметризации [13], позволяющий получить следующую зависимость для расчета турбулентных потоков тепла с учетом скорости ветра и пилomotorной реакции волосяного покрова:

$$Q_v = \rho_v C_v \frac{u_z \chi^2}{\left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right)^2} (t_z - t_k),$$

где u_z — скорость ветра, z, z_0 — толщина меха с учетом пилomotorной реакции и при ее отсутствии, χ — масштабный множитель, t_z — температура воздуха на поверхности меха.

Лучистый поток с поверхности кожи балансируется возвратным излучением $R_z|_0 = Q_1 = 0$. Радиационная теплоотдача внешней поверхности меха определяется приближенно:

$$R_z \approx \frac{\eta}{h} (t_k - t_b),$$

Запишем выражение для теплопродукции, учитывая приведенные оценки и соотношения:

$$M = \psi m^n + \int_{\Omega} \left(\frac{\varepsilon}{h} (t_k - t_b) + \rho_v C_v \frac{u_z \chi^2}{\left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right)^2} (t_k - t_z) + R_z \right) d\Omega,$$

где ψ, n — параметры Рубнера. Исключим из уравнения теплоотдачи t_k , тогда, учитывая коротковолновый радиационный разогрев [12], получим:

$$M = \psi m^n + \int_{\Omega} \frac{K_M \Delta t - l}{(\lambda K_M + 1)} d\Omega,$$

где: $\Delta t = t_R - t_b$, K_m — коэффициент теплопроводности меха:

$$K_M = \frac{\varepsilon + \eta}{h} + \rho_v C_v \frac{u_z \chi^2}{\left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right)^2},$$

$$l = l_0 (1 - A) (\beta_1 + \beta_2 E H h + \beta_3 \cos h),$$

здесь: I_0 — суммарная радиация по [14], A — альbedo, h — высота солнца, EH — полный эллиптический интеграл, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — компартментные параметры. Заменяв K_M и λ их средними значениями окончательно получим:

$$M = \psi m^n + \frac{K_M \Delta t - \bar{l}}{\lambda K_M + 1} \Omega.$$

Перераспределение энергии при выполнении мышечной работы определяется исходя из соотношений баланса. Запишем выражение для полной мощности в виде:

$$Q = \alpha_0 q + Q_T + \alpha a_j q,$$

где α — КПД перевода рабочей мощности организма в механическую, α_0 — КПД основного обмена, a_j — коэффициент локомоционной активности, Q_T — теплоотдача организма:

$$Q_T = Q_0 + (1 - \alpha) a_j q,$$

здесь Q_0 — термогенез покоя. При $a_j = 0$ имеем $Q_T = Q_0$, с ростом мышечной активности баланс сохраняется и Q_0 уменьшается. При $(1 - \alpha)q = Q_0$ включается механизм физической терморегуляции, направленный на сброс излишков тепла.

Модель энергозатрат оленя построена по компартментному принципу. Тепловое сопротивление для различных по толщине меха, величине жировых отложений, гипотермической специфике участков тела (туловищной части, верхнего отдела конечностей и живота, дистального отдела конечностей) рассчитываются в отдельных блоках. Суточные энергозатраты находятся в зависимости от бюджета времени и суммарных трат в тот или иной период активности.

Для популяции в целом энергорасход определяется с учетом количества животных различных половозрастных групп и массы особей. Структура алгоритмической модели энергозатрат животных представлена блоками механизмов и блоками компартментов энергообмена. В первом типе блоков моделируются энергетические потери животного с дыханием; радиационные, конвективные и турбулентные тепловые потоки; водный и базальный обмен организма. Второй тип блоков позволяет исследовать энергетические эффекты,

Таблица 1. Величина теплового сопротивления меха $r = 1 / K_M$ ($m^2 \cdot ч \cdot ^\circ C / ккал$), лабораторные условия.

участок тела	толщина меха, мм	Скорость ветра					
		1 м / с		5 м / с		11 м / с	
		расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
бок	30	0.70	0.746	0.52	0.516	0.41	0.406
спина	27	0.63	0.652	0.47	0.490	0.37	0.370
Запястье	6.6	0.15	0.234	0.11	0.192	0.08	0.172

связанные с морфологическими особенностями тела, "тепловыми окнами" организма и бюджетом активности животных. Модель была реализована в системе автоматизации САПФИР-КОГНИТРОН, что существенно сократило время, потраченное на ее разработку и отладку.

При настройке и верификации модели использовались эмпирические данные, опубликованные в работах [8, 15-18]. В табл. <1,2> приведены рассчитанные на модели и экспериментальные калориметрические данные о величине теплового сопротивления меха r (обратного значению его теплопроводности K_M) и величине тканевой теплоизоляции LMB . Результаты показывают достаточно хорошо адекватность разработанной биотеплофизической модели.

2. Результаты моделирования

При проведении машинных экспериментов на модели энергозатрат расчеты велись по среднемесячным значениям климатических факторов для получения сезонной динамики энергозатрат животных, а также по среднесуточным и срочным значениям для выявления воздействия кратковременных колебаний погодных условий на состояние животных. Рассмотрим некоторые из полученных результатов.

Таблица 2. Величина теплового сопротивления меха r и тканевой теплоизоляции LMB (clo), полевые условия, скорость ветра 5 м / с.

	Температура воздуха					
	-40 ⁰ С		-10 ⁰ С		0 ⁰ С	
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
$r = 1/K_M$	4.3	4.72	3.2	3.15	3.2	2.04
LMB	0.3	0.39	0.24	0.23	0.18	0.19

2.1. Теплопроводность меха и тканей

При исследовании теплопроводных характеристик покровных тканей организма северного оленя рядом авторов [17,19] была установлена определяющая роль "оболочки" в поддержании температурного гомеостаза животного в условиях Арктики. В то же время результаты исследования терморегуляторной роли меха и подстилающей мех оболочки разноречивы, роль отдельных гидрометеорологических факторов, определяющих общую термоизоляцию организма, не описана. В связи с этим нами были проведены численные эксперименты для оценки влияния температуры и ветра на теплопроводность меха, оценки теплопроводности меха отдельных компартментов и влияния сопротивления тканей на тепловой поток.

На основании имеющихся литературных данных в модели принято, что при уменьшении температуры толщина меха животных линейно увеличивается. Соответственно возрастает его термоизоляция. Расчеты показали, что при тихой погоде и понижении температуры от -10 до -40⁰ теплопроводность меха уменьшается на 40-50% за счет пилоэрекции. При температуре воздуха -10⁰С и скорости ветра 15 м/с теплопроводности меха увеличивается в 2 раза, а при скорости ветра 30 м/с — в 3 раза по сравнению с теплопроводностью при тихой погоде. При снижении температуры воздуха до -40⁰С теплопроводность меха возрастает за счет ветра соответственно в 4 и 8 раз. Таким образом, пиломоторная реакция волосяного покрова не компенсирует возрастание теплоотдачи при увеличении температурного градиента воздух-организм и тем более уменьшение термоизоляции меха при усилении ветра.

Изменение теплопроводности меха на различных участках тела обеспечивает возрастание плотности энергетического потока в области "тепловых окон" в 4 раза по сравнению с зонами максимальной теплоизоляции. Это иллюстрирует высокую эффективность теплозащитных свойств меха.

Сопротивление тканей оценивали по данным термотопографии кожи представленных в работе [18]. Как показали расчеты, относительная изменчивость тканевой теплоизоляции велика, особенно на дистальных отделах конечностей, и составляет более 500% между минимальным и максимальным уров-

нем. Такие значительные изменения теплопроводящих свойств объясняются способностью животных управлять физиолого-гидравлическими параметрами артериовенозной системы голени, запястья, жировых оболочек, играющих роль регулируемого теплообменника.

В то же время вклад слоев оболочки, подстилающей мех, в общую теплоизоляцию "ядра" оказался незначительным. Анализ числовых значений тканевой теплоизоляции показал, что изменчивостью этой величины можно пренебречь при практических расчетах потоков тепла с поверхности тела северного оленя.

2.2. Теплоотдача животного в условиях зимы

На модели исследовалась теплоотдача организма северного оленя в состоянии покоя в период полярной зимы, когда влияние солнечной радиации на энергообмен животного практически отсутствует. Расчеты показывают, что линейный рост теплопотерь имеет место при использовании всех доступных морфофункциональных средств экономии тепла. Относительное увеличение теплоотдачи в диапазоне температур -10° — -55°C при скорости ветра 5 м/с составляют 45%.

Значительное охлаждающее воздействие на животных оказывает ветер. Скорость ветра определяется по флюгеру (высота мачты 9-13 м) или с помощью анеморумбометра. Поэтому для расчетов в модели была сделана логарифмическая экстраполяция измеренных значений по флюгеру на деятельную поверхность земли. Ветер обуславливает турбулентные теплопотери. Его охлаждающее действие на северного оленя при скорости ветра 5-10 м/с на каждые 1 м/с эквивалентно влиянию снижения температуры воздуха на $3-5^{\circ}\text{C}$. В пределах севера Средней Сибири разброс скоростей ветров составляет 10 м/с для некоторых среднемесячных значений. Этим объясняется определяющее значение ветра в формировании пространственной структуры ареала таймырской популяции диких северных оленей. Однако как биоэнергетический фактор ветер ранее в литературе не рассматривался.

Абсолютный прирост теплопотерь при увеличении приземного ветра от 0 до 5 м/с при -30°C составляет 1000 ккал или 25% суточного расхода тепла организмом. Как показали расчеты, бытующая точка зрения о непроницаемости для ветра меха северного оленя не верна. Охлаждающее воздействие ветра во всем его возможном диапазоне скоростей значительно больше регулирующей роли пилomotorной функции. В теплофизических эквивалентах их вклад различается почти на порядок. В то же время, если рассматривать скорости ветра наибольшей повторяемости, то эти показатели по величине оказываются близкими.

2.3. Влияние инсоляции на метаболизм организма

Если при отрицательных температурах основными абиотическими факторами энергообмена северного оленя являются температура воздуха, скорость ветра, глубина и плотность снежного покрова, а адаптивные особенности индивидуального развития, питания, поведения животных направлены на экономию энергии с целью поддержания термостабильности организма, то в период положительных температур к параметрам, определяющим энергообмен, добавляются радиационные факторы: прямая и диффузная радиация, облач-

ность. В районах летних пастбищ за счет увеличения продолжительности солнечного сияния при наступлении полярного дня количество лучистой энергии, поступающей от Солнца и атмосферы (суммарная радиация) приближается к таковой в районах среднеазиатских республик. В июне-июле напряжение прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность при ясном небе достигает 10000 ккал/м^2 за сутки [20], в то время, как расходная часть теплообмена животных в эквивалентном выражении составляет около 2000 ккал/м^2 при $T_B = 20^\circ \text{C}$, $U = 5 \text{ м/с}$, что приводит к тепловому дисбалансу. Адаптации животных в период положительных значений температуры воздуха направлены на поддержание стабильного состояния организма относительно верхней границы термонейтральной зоны.

При проведении численных экспериментов по диагностике радиационных факторов биоклимата диких северных оленей в зимний период хотелось выяснить, может ли при отрицательных температурах воздуха непосредственно инсоляция привести к критическому уровню физиологического состояния животных, каков вклад отдельных гидрометеорологических процессов в энергобаланс популяции. Расчеты проводились с использованием СУД Аисори [21], установленной для этой цели в ВЦ Норильского горно-металлургического комбината, и срочной информации метеостанции Ессей в районе зимовок диких северных оленей. В апреле начинаются массовые миграции оленей из этого района на север в тундровые зоны Таймыра. Метеорологические условия апреля еще характерны для зимы с устойчивыми сильными морозами и пургами, средняя многолетняя температура -14.2°C . Расчеты для типичного хода метеофакторов показали, что вклад солнечной радиации в общем энергобюджете организма сопоставим с энергетическим воздействием на него температуры воздуха и ветра.

Экстремальное влияние солнечной радиации на энергообмен северных оленей оценивалось по максимальным значениям прямой и диффузной радиации при ясном небе в полуденные часы [22]. Как показали расчеты, при характерных для Арктики интенсивностей солнечной радиации $SS = 1 \text{ ккал/см}^2 \text{ мин}$, $DS = 0.5 \text{ ккал/см}^2 \text{ мин}$ энергосброс организма животного не обеспечивает толерантности северных оленей к максимальной инсоляции. Энергетическое состояние северных оленей, особенно телят, в ясную безветренную погоду при температуре воздуха, равной -5°C в апреле, приближается к верхней границе термотолерантности организма, находящейся на уровне основного обмена.

Таким образом, энергетический эффект инсоляции, а не температура воздуха способны вызвать значительный температурный дискомфорт животных и быть причиной миграции оленей в более благоприятные для них климатические зоны. Полученные с помощью модели результаты говорят о необходимости учета радиационной характеристики ареала популяции северных оленей как зоогеографического фактора ее территориального размещения.

2.4. Терморегуляция организма и активность

Связь терморегуляционной функции с активностью имеет две стороны. Во-первых, активность является дополнительным источником теплоснабжения организма при дефиците теплового баланса. Во-вторых, условия теплообмена накладывают ограничения на активность при перегреве организма. В качестве примера в табл. <3> приведено значение кормодобывающей активности a_2 в зависимости от высоты снежного покрова и максимальное значение этого ко-

эфициента $a2^{MAX}$, ограниченное температурой воздуха и скоростью ветра. По нашим оценкам, максимальная механическая мощность, развиваемая диким северным оленем не превосходит $2.4q$, таким образом доступность кормов определяется двумя факторами — предельной механической мощностью, развиваемой животным и условиями теплоотдачи. Значение $a2=0$ соответствует абсолютной доступности зимних кормов, если $a2>2.4$ или $a2>a2^{MAX}$, то корма становятся недоступными вследствие физиологических ограничений организма животного.

Таблица 3. Коэффициент кормодобывающей активности $a2$ в зависимости от высоты снежного покрова h , максимальное значение $a2^{MAX}$ в зависимости от температуры воздуха T_B и скорости ветра U .

h (м)	Коэффициент $a2$	T_B °C	Коэффициент $a2^{MAX}$				
			U=0 м/с	U=6 м/с	U=10 м/с	U=14 м/с	U=20 м/с
0	0	0	1.10	1.55	1.82	2.07	2.43
0.2	0.14	-10	1.39	1.95	2.29	2.61	3.05
0.4	0.57	-20	1.68	2.35	2.77	3.15	3.69
0.6	1.29	-30	1.97	2.76	3.24	3.69	4.32
0.8	2.31	-40	2.26	3.16	3.71	4.23	4.95
1.0	3.61	-50	2.34	3.56	4.19	4.77	5.59

2.5. Суммарные энергозатраты животных

Результаты расчетов суточных энергозатрат дикого северного оленя в период зимы в зависимости от высоты снежного покрова и скорости движения животного приведены в табл. <4>. Расчеты выполнены для животного массой $m=100$ кг, при температуре воздуха -35°C , бюджет времени оленей взят из работы [10]. Полученные значения энергозатрат близки к данным, приведенным в работе [8].

Таблица 4. Значение рабочих W и полных E энергозатрат (ккал) в зависимости от высоты снежного покрова (м) и скорости передвижения животного (км/ч)

Высота снежного покрова	Скорость передвижения							
	1		3		5		7	
	W	E	W	E	W	E	W	E
0	620	5270	800	5520	990	5770	1170	6010
0.2	650	5280	890	5550	1310	5860	2020	6260
0.4	730	5300	1040	5590	1690	5960		
0.6	860	5340	1230	5650	2110	6100		
0.8	1040	5400	1470	5720	2590	6350		
1.0	1270	5470	1770	5810				

Заключение

Результаты расчетов показали, что представленная модель энергозатрат является эффективным инструментом биоклиматических исследований, позволяющим проанализировать влияние погодно-климатических факторов на энергобаланс животных, оценить границы толерантности организма животных, определить суммарный расход энергии и пищевые потребности животных. При наличии наземной и спутниковой метеорологической информации по территории обитания животных может быть построено поле энергозатрат и определена его структура. Предложенный модельный подход к оценке энергозатрат живот-

ных основан на фундаментальных биофизических принципах и может быть применен как к другим популяциям северных оленей Евразии и Северной Америки, так и к копытным животным других видов.

Литература

- [1] *Хомяков Д. М., Искандарян Р.А.* Информационные технологии и математическое моделирование в задачах природопользования при реализации концепции устойчивого развития // Экологические и социально-экономические аспекты развития России в условиях глобальных изменений природной среды и климата. М.: Геос, 1997. — С. 102-119.
- [2] *Гермогенов М. Т., Полевой А. Н., Грингоф И. Г.* Моделирование влияния погодных условий на продуктивность оленеводства в условиях зимнего выпаса. // Совершенствование технологии и повышение экономической эффективности северного оленеводства.- Новосибирск, 1989. — С. 77-92
- [3] *Постников С. Н.* Экологическая энергетика животных в XX веке. // Сб. трудов Второй Российской Конференции: Физика в биологии и медицине. Екатеринбург, 2000. — С. 15-31.
- [4] *Анисимов О. А., Белолуцкая М. А.* Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 2002. №6. — С. 15 — 22.
- [5] *Мордовин В. Ю.* Динамическая модель теплоотдачи дикого северного оленя в зимний период // Млекопитающие и птицы Севера Средней Сибири. Новосибирск: Изд. СО ВАСХНИЛ, 1989. — С. 47-61
- [6] *Мордовин В. Ю., Михайлов В. В., Колпащиков Л. А.* Влияние снежного покрова на метаболизм и потребная энергия дикого северного оленя (полуэмпирический анализ) // Экология, ресурсы и рациональное использование диких северных оленей в СССР. Новосибирск: Изд. СО ВАСХНИЛ, 1990. — С. 84-98.
- [7] *Горшков В. Г.* Энергетика передвигающихся животных // Экология. 1982, №1 — С. 1-14.
- [8] *Соколов А. Я., Кушнир А. Р.* Биоэнергетика северного оленя. Новосибирск: Наука, 1986. — 97 с.
- [9] *Колпащиков Л. А.* Использование зимних пастбищ дикими оленями. // Проблемы охраны и хозяйственного использования ресурсов диких животных Енисейского Севера. Новосибирск: Изд. СО ВАСХНИЛ, 1979. — С. 9-29.
- [10] *Колпащиков Л. А.* Дикий северный олень Таймыра (особенности экологии, охраны и рационального использования). Автореф. канд. дисс. Норильск: 1982. — 24 с.
- [11] *Бать О. Г., Ханин М. А.* Оптимальная теплоизоляция гомойотермных // Термодинамика и регуляция биологических процессов. М.: Наука, 1984 — С. 173-181.
- [12] *Айзенштат Б. А.* Метод расчета радиационного и теплового баланса животных // Вопросы биометеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. — С. 27-49.
- [13] *Обухов А. М.* Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 414 с.
- [14] *Сивков С. И.* Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 232 с.
- [15] *Игнатов Ю. В.* Методы оценки и исследования теплозащитных свойств меха // Автореф. канд. дисс. М., 1971. — 17 с.
- [16] *Соколов А. Я.* Роль внешнего дыхания и терморегуляция северного оленя. // Важнейшие теоретические и практические проблемы терморегуляции. Новосибирск. 1982.
- [17] *Сегаль А.Н.* Терморегуляция у северного оленя // Зоол. журн. 1980, т.59, вып.11. — С. 1718-1726.
- [18] *Сегаль А. Н., Игнатов Ю. В.* Теплоотдача с поверхности тела у северного оленя. // Зоол. журн. 1974, т.53, вып.5. — С. 747-755.
- [19] *Шмидт-Ниельсен К.* Физиология животных. Приспособление к среде. М.: Мир, 1982. Т.1. — 414 с.
- [20] *Пивоварова З. И.* Радиационные характеристики климата СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977, — 335 с.
- [21] *Веселов В.М.* Технологическая поддержка организации архивов Госфонда на ПЭВМ. Технология «Аисори — АРМ ЯОД-Архив». // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2002. Вып. 170. С. 66-85.
- [22] *Справочник по климату СССР.* Л.: Гидрометеиздат, 1967. Вып.21. — Ч.1-5.