

## Общие закономерности машущего полета

Ю. И. Лобановский

### Краткое содержание

В работе определяется удельная мощность, необходимая для совершения машущего полета. Она сравнивается с таким же показателем полета с использованием крыла со стационарным обтеканием, а также с мощностными характеристиками человека. Показано, что именно этот параметр ограничивает размеры существ, совершающих машущий полет. Объяснено, почему в миоцене (около 5 – 20 миллионов лет назад) могли летать примерно вдвое более крупные птицы, чем сейчас. Доказана невозможность машущего полета человека на Земле за счет его собственных физических усилий.

**Ключевые слова:** машущий полет – энергетика – размерность – буревестник – кондор – пелагорнис – аргентавис – человек

### Таблица символов

$c$  – скорость звука

$e < 1$  – фактор Освальда

$G$  – вес

$g$  – ускорение свободного падения

$k = 0.80 \pm 0.10$  – эмпирический коэффициент

$K$  – аэродинамическое качество

$L$  – размах крыла при машущем полете

$L_{\max}$  – размах крыла как расстояние между его концами

$m$  – масса

$n$  – частота взмахов крыла

$S$  – площадь крыла

$v^*$  – характерная скорость

$u$  – скорость полета

$W$  – мощность

$Y$  – подъемная сила

$\lambda = L^2/S$  – удлинение крыла

$\eta = 0.90$  – интегральный коэффициент

$\xi = 0.96$  – коэффициент нормальной силы сечения крыла

$\gamma$  – коэффициент полезного действия винта или пропульсивный коэффициент полезного действия силовой установки

$\rho$  – плотность воздуха

### I. Введение

В работе [1] были получены формулы для расчета величины подъемной силы при машущем полете в режиме висения для всего разнообразия летающих существ (насекомых и птиц, или, иными словами, летунов), имеющих в природе в диапазоне масс от 2 г (красная колибри – *Phaethornis ruber*) до 15 кг (андский кондор – *Vultur*). Несмотря на то, что в таком режиме способны находиться далеко не все летуны, тем не менее, этот наиболее просто оцениваемый и наиболее энергонапряженный режим удобен для получения предельных энергетических и массово-геометрических требований, которым должно соответствовать такое живое существо. Тем более что режим взлета с места на его начальном участке по требованиям практически эквивалентен режиму висения, а взлетать приходится всем. В связи с этим стоит отметить, что наиболее крупные птицы – андские кондоры и почти сопоставимые с ними по массе канадские казарки, странствующие и королевские альбатросы, а также розовые пеликаны, взлететь с места практически неспособны. Кондоры и альбатросы, обычно, взлетают с горных уступов, береговых обрывов (альбатросы – еще и с океанских волн при встречном ветре), так что в первый момент им можно допускать просадку траектории полета вниз, то есть иметь подъемную силу несколько меньшую, чем их вес. А крупные птицы, живущие на пресной воде, при взлете разгоняются по ней подобно самолетам.

В результате анализа был сделан вывод, что чем крупнее такой летун, тем сложнее ему реализовать полет, и было показано, что в земных условиях человек не способен совершать машущий полет. Тем не менее, в последнее время появились сообщения о том, что в древности существовали более крупные летающие птицы, масса которых, якобы, была близка к массе человека. Так может быть, они были, и машущий полет человека с использованием собственных мускулов все-таки возможен? Попытаемся в этом разобраться.

## II. Энергетика машущего полета

Было показано, что для летунов, отличающихся по массе почти на 4 порядка ( $2 - 1.5 \cdot 10^4$  г) с точностью не менее  $\pm 10$  % выполняется соотношение

$$Y = \frac{8k\xi\rho c L S n}{9\pi^2 \eta}, \quad (1)$$

где  $Y$  – подъемная сила, развиваемая летуном на месте (при нулевой горизонтальной скорости),  $k = 0.80 \pm 0.10$  – эмпирический коэффициент,  $\xi = 0.96$  – коэффициент нормальной силы сечения крыла при срывном обтекании,  $\rho$  – плотность воздуха,  $c$  – скорость звука,  $L$  – размах крыла,  $S$  – его площадь,  $n$  – частота взмахов крыла,  $\eta = 0.90$  – интегральный пересчетный коэффициент. При этом при определении размаха крыла в формуле (1) из расстояния между его концами вычитался промежуток между плечевыми опорными суставами летуна, так как подъемную силу создают только движущиеся при махе полукрылья.

Затрачиваемая при этом мощность  $W$  равна

$$W = Yv^*, \quad (2)$$

где характерная средняя по маху крыла скорость  $v^*$  определяется по формуле

$$v^* = \frac{\pi^3 L n}{48k} \quad (3)$$

При равенстве подъемной силы  $Y$  и веса летуна

$$G = mg, \quad (4)$$

где  $m$  – масса летуна,  $g$  – ускорение силы тяжести, для режима висения мы получаем минимальный уровень удельной мощности существа на режиме висения  $W/m$ :

$$\frac{W}{m} = gv^* \quad (5)$$

В таблице 1 представлены данные из работы [1] по основным параметрам 5 летунов, из которых на основании формул (1), (4) был определен эмпирический коэффициент  $k$ .

Таблица 1

N	Птица/насекомое	m (кг)	L (м)	S (м <sup>2</sup> )	n (с <sup>-1</sup> )	k	v* (м/с)	W (Вт)
1	<b>Колибри</b>	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$2.75 \cdot 10^{-4}$	50	0.83	1.8	$3.5 \cdot 10^{-2}$
2	<b>Майский жук</b>	$3.0 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	45	0.82	2.0	$5.9 \cdot 10^{-2}$
3	<b>Голубь</b>	0.39	0.50	$5.0 \cdot 10^{-2}$	5.25	0.74	2.1	8.1
4	<b>Серая ворона</b>	0.74	0.70	0.11	3.0	0.80	1.7	12
5	<b>Андский кондор</b>	15	2.9	1.4	1.0	0.92	2.3	340

Из этой таблицы видно, что скорость  $v^* = 2.0 \pm 0.3$  м/с, причем разброс этой величины не больше, чем разброс значений параметров летунов, по которым определены как она, так и эмпирический коэффициент  $k$ . Таким образом, мы можем считать, что величина скорости  $v^* \approx 2.0$  м/с для всех известных нам летающих существ. А это означает, что удельная мощность их всех составляет величину  $W/m \approx 20$  Вт/кг. Все они в качестве источника энергии для полета используют биохимическую энергию своих мускулов, тела их всех в результате длительной эволюции оптимизированы для полета и в том числе для короткого периода интенсивной работы крыльями при взлете. После взлета требуемая для машущего полета мощность падает, видимо, до уровня порядка 10 Вт/кг, а многие птицы могут совершать и достаточно длительный планирующий полет, когда затраты их энергии весьма малы.

В рассматриваемом контексте представляет интерес сравнение энергозатрат летунов с тем, что может реализовать человек, а также с энергозатратами технических объектов, выполняющих полет с использованием принципа полета на неподвижном (не совершающем махи) крыле, принципиально отличающегося от принципа машущего полета.

### III. Сравнение энергетических возможностей летунов и человека

Развиваемая человеком мощность в первую очередь зависит от длительности ее генерации. В зависимости от степени тренировки в течение 20 – 60 с человек «быстрыми» анаэробными мышцами может развивать мощность в несколько сот ватт. Элитные велоспринтеры мирового уровня в течение одной минуты могут выдавать мощность в 700 Вт с пиковым значением 1.7 кВт, при том, что их типичная масса составляет ~70 кг [2]. Таким образом, их удельная мощность составляет 10 Вт/кг при работе в аэробном режиме с пиком 25 Вт/кг в течение времени порядка секунды.

Мировой рекорд в тяжелой атлетике в рывке в категории до 56 кг составляет 139 кг, то есть, вес штанги в 2.5 раза больше веса спортсмена [3]. Из анализа видео первой фазы рывка [4], длящейся несколько менее 1 с, следует, что спортсмен-легковес поднимает штангу, в основном, за счет работы ног на высоту около 0.8 м. Из этих данных легко оценить, что удельная мощность рекордсмена в этом весе У Цзиньбяо в этот момент превышала 20 Вт/кг, что хорошо коррелирует с пиковыми значениями велоспринтеров-рекордсменов.

«Длительная» (порядка часа) аэробная мощность лучшей десятки мировых гонщиков по шоссе составляет около 420 Вт, то есть около 6 Вт/кг. Знаменитые велогонщики Альберто Контадор (масса 62/66 кг) и Лэнс Армстронг (71 кг), в течение 20 – 35 минут выдавали 490 – 500 Вт, то есть около 7 – 7.5 Вт/кг [2]. Возможно, что эти данные несколько завышены, или они, как и следовало ожидать, были получены под воздействием допинга, за принятие которого оба гонщика были пожизненно дисквалифицированы с лишением всех спортивных титулов [5, 6]. Не рекордсмен, но тренированный велогонщик, пилот мускулолетов Госамер Кондор и Госамер Альбатрос Брайан Аллен в течение 7 минут, крутя педали, развивал мощность 330 Вт (точно как андский кондор на взлете, что парадоксальным образом идеально соответствует названию первого аппарата) при собственной массе 66 кг [7] (что, примерно, в 4 раза больше массы кондора). То есть, его удельная мощность составляла 5 Вт/кг.

При этом птицы и насекомые летают все (из тех, которые вообще могут летать), а не только их рекордсмены. Поэтому, величины W/m несколько ниже рекордных – порядка 5 Вт/кг в течение примерно 10 минут и 10 Вт/кг в течение нескольких десятков (30 – 40) секунд для людей представляется реалистичной базой для сравнения их показателей с показателями существ, способных совершать машущий полет. Продолжительность взлета для крупных летунов как раз примерно соответствует второму режиму. Следовательно, летуны способны выдавать в 2 раза большую удельную мощность, чем весьма тренированные люди. Соответственно, можно полагать, что длительная удельная мощность машущего полета с некоторыми участками планирования, что часто демонстрируют птицы, составляет около 10 Вт/кг. По-видимому, биохимия птиц может позволить снимать большую удельную мощность с их мышц вследствие большей на 5.5 – 8.5 К температуры их тела (можно также вспомнить, что насекомые теряют возможность летать при понижении температуры окружающей среды). Но, к тому же, птицы еще и имеют строение тела, более оптимизированное по массе, чем у существ, не способные к самостоятельному полету, включая человека. Не стоит даже упоминать о том, что для полета человеку потребуются дополнительные конструкции, значительно снижающие удельные показатели мощности всей такой системы.

### IV. Сравнение энергетических возможностей некоторых летающих технических объектов и требований к машущему полету

Как известно, человек все-таки смог полететь, опираясь на силу своих мускулов. При этом использовался полет со стационарным обтеканием несущей поверхности (крыла) с созданием горизонтальной тяги с помощью винта, приводимого во вращение ногами пилота. Такие аппараты стали называть мускулолетами. Легко вывести аналог формулы (5) для данного случая:

$$\frac{W}{m} = \frac{gu}{\gamma K}, \quad (6)$$

где  $u$  – скорость горизонтального полета,  $\gamma$  – к. п. д. винта,  $K$  – аэродинамическое качество аппарата (отношение его подъемной силы к сопротивлению).

Значение максимального аэродинамического качества  $K_{\max}$  на интересующих нас режимах полета можно оценить по формуле

$$K_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi e \lambda}{C_{x0}}}, \quad (7)$$

где  $e$  – фактор Освальда,  $\lambda$  – удлинение крыла,  $C_{x0}$  – коэффициент сопротивления при нулевой подъемной силе [8, 9]. Полеты мускулолетов проходили на режимах, аэродинамическое качество на которых близко к величине  $K_{\max}$ , уровень которого составлял 15 – 30, что весьма снижало требования к энергетике полета.

Первым успешным аппаратом такого рода был мускулолет Госамер Кондор, пилотируемый Брайаном Алленом. На крейсерском режиме его потребная мощность составляла 260 Вт, масса аппарата – 32 кг (98 кг вместе с пилотом) [10]. Таким образом, удельная мощность при полете  $W/m = 2.65$  Вт/кг (3.9 Вт/кг по массе пилота). При этом крейсерская скорость была около 3.5 м/с, к. п. д. винта  $\gamma = 0.7 - 0.75$ , и при  $K \approx 18.5$  (что вполне коррелирует с удлинением крыла аппарата  $\lambda = 15.2$  [11]) получается согласование всех рассматриваемых параметров в соответствии с формулой (6).

На более совершенном мускулолете Дедал в апреле 1988 года был совершен перелет на расстояние 115 км от острова Крит до острова Санторин (Тира). Средняя воздушная скорость Дедала в этом полете составляла около 6.7 м/с (попутный морской бриз со скоростью  $\sim 1.5$  м/с подгонял мускулолет по трассе) [12, 13]. Так как удлинение его крыла  $\lambda = 37.8$  [11], то с помощью пересчета по формуле (7) с данных мускулолета Госамер Кондор аэродинамическое качество этого аппарата можно оценить величиной  $K \approx 30$ . Тогда средней удельной мощности  $W/m = 2.9$  Вт/кг было достаточно для совершения этого перелета (см. формулу (6)). При полной массе Дедала 104 кг вместе с пилотом – греческим чемпионом-велосипедистом Канеллосом Канеллопулосом (72 кг), потребная мощность для полета была равна 300 Вт. Таким образом, пилот в течение 4 часов должен был развивать мощность 4.2 Вт/кг относительно собственной массы, что составляет 0.7 от «длительной» (но для заметно меньшего времени) аэробной мощности лучшей десятки мировых гонщиков по шоссе.

Рекорд Дедала за прошедшие 32 года побит не был, так что указанные в предыдущем абзаце параметры планирующего полета человека с помощью собственных мускулов являются близкими к предельным, и удельной мощности, достигнутой тогда, примерно в 2.5 раза не хватило бы для реализации машущего полета (20 Вт/кг при взлете и  $\sim 10$  Вт/кг в горизонтальном полете).

При прочих равных условиях (которые не всегда можно достичь в реальности) энергетические затраты на реализацию горизонтального полета аппарата самолетного типа растут пропорционально увеличению скорости (см. формулу (6)). Оценим уровни удельной мощности для эффективных по энергетике винтовых крейсерских самолетов. Самолет Вояджер, впервые в мире совершивший беспосадочный облет Земли, при стартовой массе 4.4 т взлетал при совместной работе двух двигателей суммарной мощностью 177 кВт ( $W/m = 40$  Вт/кг). В начале пути он совершал крейсерский полет на скорости около 52 м/с при мощности 81 кВт ( $W/m = 18.5$  Вт/кг) [14]. Эти показатели примерно в 2 раза превышают требования к удельным мощностям машущего полета.

Самый массовый тяжелый бомбардировщик Второй мировой войны В-24 Либереитор развивал максимальную скорость полета  $u = 132.5$  м/с (стартовая масса самолета –  $m = 25.0$  т, максимальная мощность силовой установки на высоте –  $W = 3560$  кВт) [15]. Его удельная мощность  $W/m$  составляла 140 Вт/кг, что уже на порядок больше требований к удельным мощностям машущего полета. Чуть меньшую энерговооруженность (около 130 Вт/кг) имел лучший бомбардировщик того времени В-29, стартовая масса которого была около 54.5 т. Но так как он имел заметно большее максимальное аэродинамическое качество, чем В-24 ( $K_{\max} \approx 16.8$  против 12.9) [16], его максимальная скорость была на 27.5 м/с выше (см. формулу (6)).

Таким образом, в отличие от машущего полета, для которого (при определенных ограничениях по размеру и массе) характерны практически фиксированные требования по удельной энергетике летунов ( $\sim 20/10$  Вт/кг), энергетические требования к полету на крыле со стационарным обтеканием в зависимости от скорости полета могут изменяться многократно. Минимально технически достижимый уровень удельной мощности – это около 2.5 Вт/кг при скорости  $\sim 3$  м/с, а максимальные его значения могут быть на 3.5 порядка больше (до 10 кВт/кг) для гиперзвуковых летательных аппаратов, не только вследствие роста скорости полета, но и значительного снижения максимального аэродинамического качества на гиперзвуке (для реактивных аппаратов в формуле (6) в качестве параметра  $\gamma$  надо использовать пропульсивный к. п. д. его силовой установки, который на гиперзвуковых скоростях может достигать значения  $\sim 0.6$  [8]).

## V. Трансформация летающих существ с ростом их масштабов

При изменении размеров летунов и сохранении их геометрического подобия, их масса  $m$  будет изменяться по кубу от изменения линейного размера  $L$  ( $m \sim L^3$ ), а площадь несущей поверхности – по квадрату ( $S \sim L^2$ ). Это давно известный в авиации «закон куба – квадрата», ограничивающий размеры любого объекта, подверженного гравитационным (объемным) силам и использующего для полета аэродинамические (поверхностные) силы. Однако, в машущем полете реализация этих аэродинамических

сил осуществляется способами, отличающимися от «авиационных», поэтому будут отличаться и границы области параметров, в которой возможен такой полет. Попробуем их найти.

Из данных таблицы 1 следует, что со среднеквадратичным отклонением около 18 % площадь крыла  $S$  рассматриваемых там существ пропорциональна размаху крыла  $L$  в степени 2.1, то есть «закон квадрата» здесь с учетом погрешностей данных наблюдений приблизительно выполняется. В то же время масса  $m$  с точностью около 5 % пропорциональна размаху крыла  $L$  в степени 2.15, то есть масса летуна растет практически точно также как и площадь его крыла. Если сравнить виды в плане майского жука ( $m \approx 3$  г) и андского кондора ( $m \approx 15000$  г), то очень хорошо видно, что у первого площадь обоих полукрыльев близка к площади в плане его тела, см. рис. 1, а у кондора его тело просто теряется на фоне огромных крыльев и хвостового оперения, см. рис. 2.



**Рис. 1 – Майский жук**



**Рис. 2 – Андский кондор**

Таким образом, относительный рост крыльев по сравнению со всем летуном в целом – плата за увеличение размеров летающего существа.

Далее, из указанного в разделе II примерного постоянства характеристической скорости  $v^*$ , одной из причин которого является примерное постоянство удельной мощности всех летунов в пересчете на их полную массу, следует, что произведение размаха крыла  $L$  на частоту взмахов крыла также приблизительно постоянно:  $L\omega \approx \text{const}$ . Следовательно, при фиксированных плотности воздуха  $\rho$  и скорости звука  $c$  (а в приземном слое и в основных ареалах распространения летунов изменения этих параметров не слишком велики), подъемная сила  $Y \sim S$  (см. формулу (1)). Вес  $G = mg$  также пропорционален  $S$ , и способность к полету сохраняется при изменении масс на 3.5 порядка – от шмелей до кондоров. Таким образом, в первом приближении можно считать, что  $S \sim L^2$  и  $m \sim L^2$ . И геометрического подобия тут нет, но зато реализуются полетные режимы с примерно постоянными удельными энергозатратами.

Однако, чем больше увеличиваются размер и масса летуна, тем сложнее сохранять соотношение  $G \sim m \sim S \sim L^2$ , что наглядно видно из сравнения рис. 1 и 2. Крылья становятся все более доминирующей частью летуна, а относительный размер тела, где в основном генерируется энергия для полета, становится все меньше. И тем охотнее летуны переходят от машущего на планирующий режим полета. Начиная с канадской казарки ( $m \approx 6.5$  кг) птицы уже испытывают трудности при взлете с места с ровной поверхности. Альбатросы ( $m \approx 6 - 11$  кг) в основном планируют, используя восходящие потоки воздуха, возникающие над поверхностью океана, по которой в местах их обитания практически постоянно бегут крупные волны [17]. Тем более что размеры этих птиц, а также форма их крыльев (см. рис. 3), позволяют эффективно использовать возникающие там восходящие потоки воздуха, а также достигать высокого аэродинамического качества в планирующем полете ( $K_{\max} \sim 20$  – больше, чем у бомбардировщиков В-24 и даже В-29).



Рис. 3 – Странствующий альбатрос

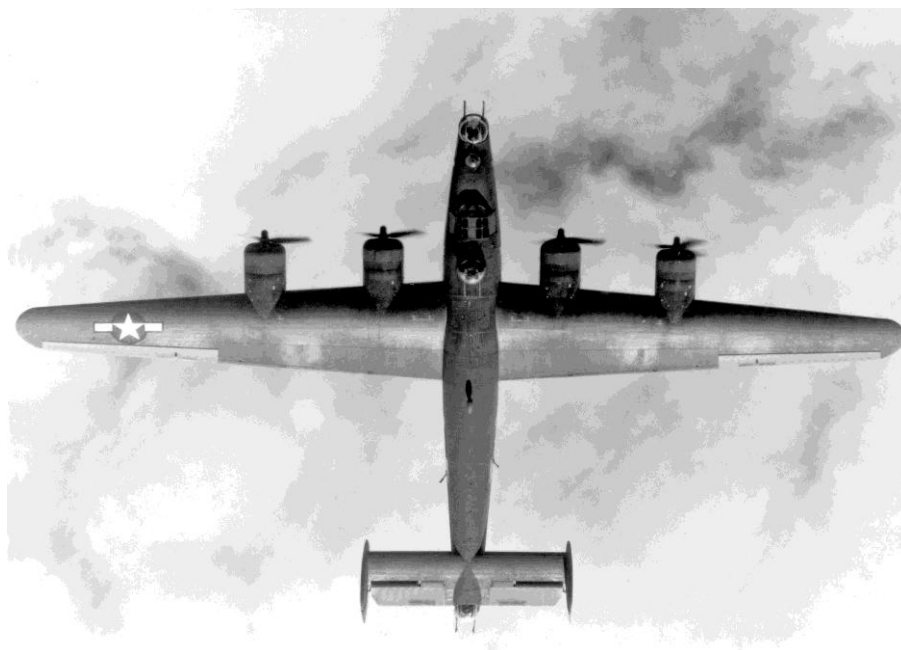


Рис. 4 – Тяжелый бомбардировщик Второй мировой войны В-24

При этом форма и удлинение крыла птиц становится похожим форму и удлинение крыла дальних самолетов, см. рис. 3, 4. В то время как истинные представители исключительно машущего полета имеют крылья совершенно иной формы и довольно малого удлинения – см. рис. 1 и 5 (масса шмеля – около 0.5 г).



**Рис. 5 – Шмель**

Таким образом, для увеличения эффективности планирующего полета крупным птицам требуются крылья все большего удлинения (см. формулу (7)). И при массе птицы, превышающей примерно 5 кг, выявленный ранее «закон квадрата – квадрата» ( $m \sim L^2$ ,  $S \sim L^2$ ) уже перестает хорошо описывать реальную ситуацию, поэтому для определения новой уточненной локальной корреляционной зависимости для крупных птиц следует более внимательно рассмотреть именно этот диапазон масштабов.

#### **VI. Предельные размеры существующих и ископаемых летающих птиц**

Рассмотрим четырех представителей крупнейших летающих птиц различных семейств, добавив к ним данные о двух живших в миоцене (5 – 23 миллионов лет назад) и сейчас вымерших крупнейших птиц в истории.

В таблице 2 показаны характеристики некоторых современных и ископаемых птиц максимальных размеров. В отличие от таблицы 1 здесь приведены только их размах крыла  $L_{max}$  (у этих птиц различие между  $L$  и  $L_{max}$  мало) и массы (заявленная  $m_1$  и расчетная  $m_2$ ), так как, по крайней мере, для миоценовых птиц, другие важные параметры неизвестны (хотя, строго говоря, их масса неизвестна также). Следует отметить, что и размах крыльев ископаемых птиц – пелагорниса и аргентависа [18, 19] определяется по их, видимо неполным костным останкам, и сколько к нему добавляло оперение, определить точно нельзя. На рис. 6 представлены два этих скелета [20], и из него следует, что размах крыльев этих птиц должен был быть, примерно, 5.5 и 4.6 м соответственно.

**Таблица 2**

<b>N</b>	<b>Птица</b>	<b><math>L_{max}</math> (м)</b>	<b><math>m_1</math> (кг)</b>	<b><math>m_2</math> (кг)</b>
1	<b>Канадская казарка</b>	1.8	6.5	6.6/6.4
2	<b>Королевский/Странствующий альбатрос</b>	3.3	11	–
3	<b>Андский кондор</b>	3.0/3.2	15	13.6/14.4
4	<b>Розовый пеликан</b>	3.4	15	16.1/15.7
5	<b>Пелагорнис</b>	5.5/6.4	22/40	22/28
6	<b>Аргентавис</b>	4.6/6.9	70/72	25/44

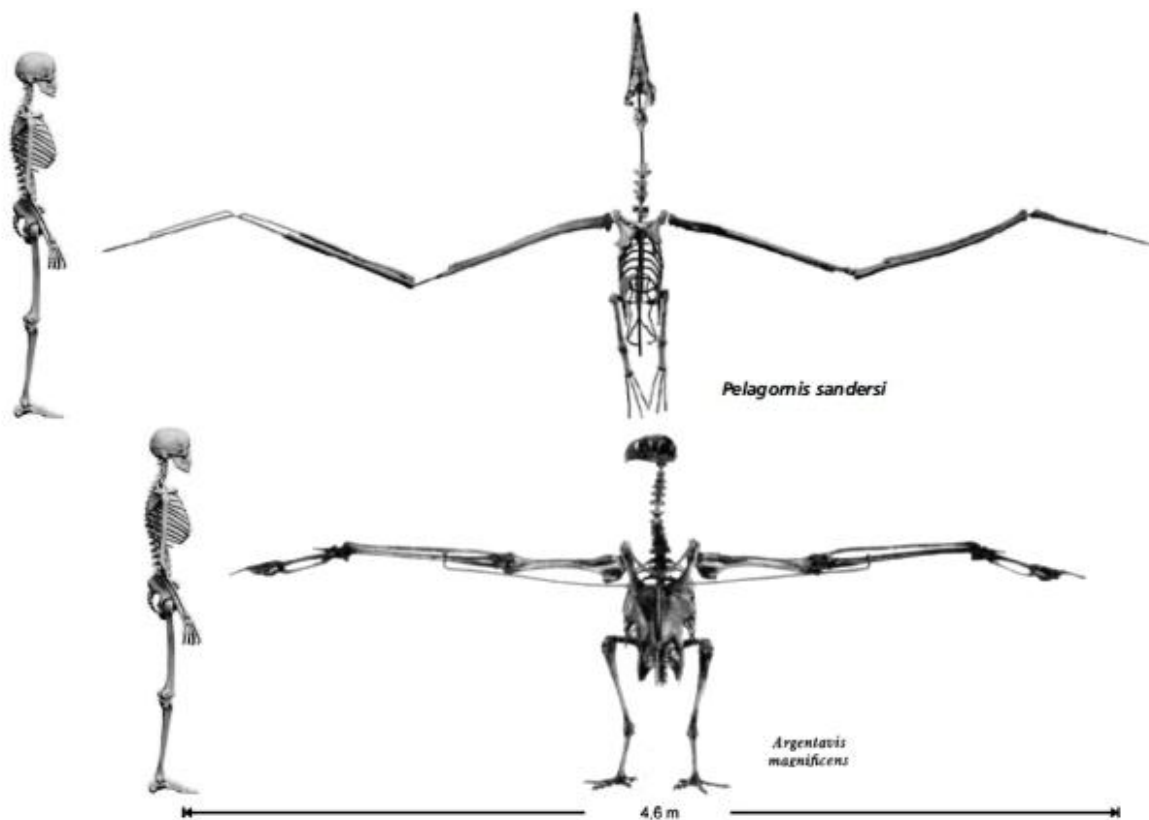


Рис. 6 – Скелеты пелагорниса и аргентависа на фоне человеческих

Однако, приводятся и значительно бóльшие значения размаха их крыльев – 6.9 и 6.4 м соответственно, а в более ранних сообщениях вообще говорилось о величинах размаха около 10 м. При этом, степень их достоверности в настоящее время представляется весьма сомнительной.

Кроме того, приводимые значения масс этих ископаемых птиц просто недостоверны, так взвесить их нет никакой возможности. Вот что пишет профессиональный палеонтолог в аналогичной ситуации о динозаврах: «...взвешивать динозавров нельзя, потому что не бывает «широких костей». У человека весом в полторы сотни килограммов и у человека весом в пятьдесят килограммов кости одинаковые. Как по ним узнать вес? Да никак» [21]. То же самое, естественно, вполне относится и к прямым и непосредственным потомкам динозавров – древним птицам. Так что приводимые палеонтологами значения масс ископаемых птиц являются достаточно умозрительными и могут отличаться от реальных в разы.

Поэтому, вследствие того, что выявлены четкие корреляционные зависимости для всех летунов в очень широком диапазоне параметров, можно опираться на их более точные проявления в узком диапазоне параметров для крупнейших современных птиц на самой границе широких корреляций, а затем экстраполировать ее и на птиц вымерших (см. таблицу 2). В ней приведены два значения размаха крыльев кондора, так как эта величина постоянно варьируется в имеющихся источниках информации. Следует отметить, что здесь, в отличие от раздела II, рассматривается полный размах без исключения из него расстояния между опорными суставами двух полукрыльев.

При этом сразу видно, что альбатросы должны несколько выпадать из общей корреляционной зависимости для этих птиц, так как удлинение крыла у них заметно выше, чем у остальных (см., например, рис. 2 и 3). Оказалось, что с точностью до 3.5 % зависимость массы от размаха крыла для трех современных больших птиц из таблицы 2 оказывается следующей:

$$m \sim L_{\max}^{\frac{7}{5}}, \quad (8)$$

так что «закон квадрата – квадрата» для птиц, из «махателей» становящихся «парителями», превращается в зависимость от степени 7/5, значительно более близкую к линейной, как для массы, так, очевидно, и для площади крыла, по его размаху. Заявляемая масса  $m_1$  в таблице 2 – это приписываемые им значения этого параметра в различных источниках, расчетная масса  $m_2$  получена по формуле (8) после осреднения характеристик всех трех рассмотренных птиц. Первое число получено для размаха крыла кондора 3.0 м, а



второе – для размаха 3.2 м. Видно прекрасное согласование заявляемых и расчетных масс, особенно для второго случая.

Это является еще более ярким свидетельством кризиса масштаба у «махателей» – крылья, возрастая в размерах для увеличения их площади, из соображений прочности должны увеличивать свою толщину. Поэтому их масса растет быстрее, чем масса всего летуна в целом, вследствие чего уменьшается доля массы тех структур их тела, которые отвечают за выработку энергии. И при сохранении их эффективности, определяемой скоростью проходящих в них биохимических реакций, удельная мощность летуна (отношение вырабатываемой мощности к его полной массе) начинает снижаться. И у него появляются затруднения при взлете, да и длительный машущий полет становится для него невозможным. Вследствие этого возникает стремление повысить эффективность планирующего полета, а это можно сделать практически единственным способом – увеличением удлинения крыла. Но чем больше удлинение, тем тяжелее крыло, и еще меньше массы остается на структуры тела летуна, обеспечивающие энергией его полет. То есть указанное выше противоречие при таком способе его решения только обостряется. Кроме того, чем длиннее (при прочих равных условиях) крыло, тем затруднительнее совершать взлет с ровной поверхности. Очевидное решение для сухопутных летунов – увеличение длины ног, а, значит, и увеличение их массы, только еще более обостряет «махательный кризис».

Таким образом, из всей имеющейся информации следует, что масса 15 кг очень близка к предельной массе современных существ, способных совершать достаточно длительный уверенный и устойчивый полет.

Известно, что пелагорнис – близкий функциональный аналог альбатроса, а аргентавис – кондора. Поэтому, воспользовавшись формулой (8), точность которой определена в 3.5 %, пересчитаем массу этих птиц по размаху их крыльев с масс альбатроса и кондора ( $L_{\max} = 3.2$  м) соответственно. Тогда при достоверно установленных размахах их крыльев – 5.5 и 4.6 м их массы составляют 22 и 25 кг. При размахах 7.4 и 6.9 м, которые, насколько известно автору, не подтверждены документально по костным остаткам, а являются плодом спекулятивных размышлений некоторых палеонтологов над найденными ими неполными скелетами, масса пелагорниса могла достигать до 28 кг, а аргентависа – до 44 кг, см. таблицу 2. В целом, масса пелагорниса, полученная по этим оценкам, почти совпадает со спекулятивными представлениями палеонтологов, хотя обоснованным является только нижнее ее значение, которое одинаково для обоих типов данных. А у аргентависа спекуляции палеонтологов завышают его массу в 2.5 – 3 раза.

Представляется, что полученный результат: масса крупнейших миоценовых птиц составляет не более 25 кг (максимум, 30 кг) кажется вполне обоснованным. Однако, тогда возникает вопрос: почему раньше, в миоцене, могли летать птицы, почти вдвое более крупные чем современные?

## **VII. Причины гигантизма миоценовых птиц**

Вопрос об этом уже неоднократно задавался, однако ответы на него, насколько известно автору этой работы, были совершенно неудовлетворительными. Утверждается, что такие размеры и массы птиц могли быть связаны с постоянно дующими тогда ветрами из-за иного расположения земных материков [22]. Однако, и сейчас над водами Южного океана в районе «ревущих сороковых» дуют постоянные сильные ветры, но масса лучших современных птиц-парителей – альбатросов, составляет не более  $\frac{3}{4}$  от масс самых крупных современных летающих птиц (см. таблицу 2). Кроме того, ветер, хоть и облегчает взлет птицы, но полностью проблем не устраняет, особенно при большом удлинении крыла, если нет возможности у птицы с таким крылом спрыгнуть с какого-нибудь обрыва.

А ведь описанный в предыдущем разделе «махательный кризис», как и любой кризис такого рода, развивается с обострением (то есть с резким, гиперболическим нарастанием количественных требований к противоречивым характеристикам), и наложенные им пределы не могут быть преодолены за счет каких-либо хитростей или уловок. В принципе, в соответствии с закономерностями, описываемыми формулами (1) – (5), существуют только 2 способа «сдвинуть вправо» границы этого кризиса: либо снизить «массу конструкции» птицы, либо увеличить ее удельную мощность. При снижении относительной массы крыла и скелета в целом появляется возможность вернуться к уровням относительной массы структур, вырабатывающих энергию для полета, характерным для летунов меньшей массы. Однако, это требует значительного роста прочности «конструкции» скелета, что, насколько нам известно, не может быть достигнуто никакими реальными способами для структур биологического происхождения. В то же время, увеличение удельной мощности структур, вырабатывающих энергию, при определенных условиях представляется не только возможным, но и необходимым.

Из курса биохимии хорошо известно, что скорость белковых биохимических реакций, являющихся источником энергии летающих существ, зависит от температуры, при которой они происходят. До некоторой температуры, с которой начинается денатурация белка (обычно, она в среднем составляет около

50°C, хотя есть и белки с заметно бóльшим температурным оптимумом), активность белка растет приблизительно в 2 раза при каждом увеличении температуры на 10°C [23]. Отметим, что температура тела птиц (42°C – 45.5°C) [24] на 5.5° – 8.5° выше, чем обычная температура человека, и активность метаболизма, а, значит, и удельная мощность мышц птиц должна быть в 1.5 – 1.8 раза больше человеческой. И это неплохо согласуется с оценками, представленными в разделе III данной работы. Стоит также отметить, что температура тела крупных нелетающих птиц типа страуса, в отличие от птиц летающих, весьма близка к температуре тела человека.

При этом также известно, что во время интенсивного машущего полета птицы перегреваются [25]. И если температура окружающей среды высока, для охлаждения тела им требуется некоторый период отдыха. Если же эта температура заметно возрастает на всей Земле, то представляется логичным, что для адаптации к окружающей среде птицы будут вынуждены увеличивать максимальную температуру своего тела. Между тем в миоцене, времени, когда существовали интересующие нас древние птицы, глобальная температура превышала современную на 4° – 6° (см. рис. 7, [26]), и максимальная температура их тела могла и должна была превышать современную, как минимум, на такую же величину. При этом она все еще не превышала бы даже типичную температуру денатурации современных белков, тем более что адаптация могла и несколько поднять значение этого параметра для белков птиц того времени.

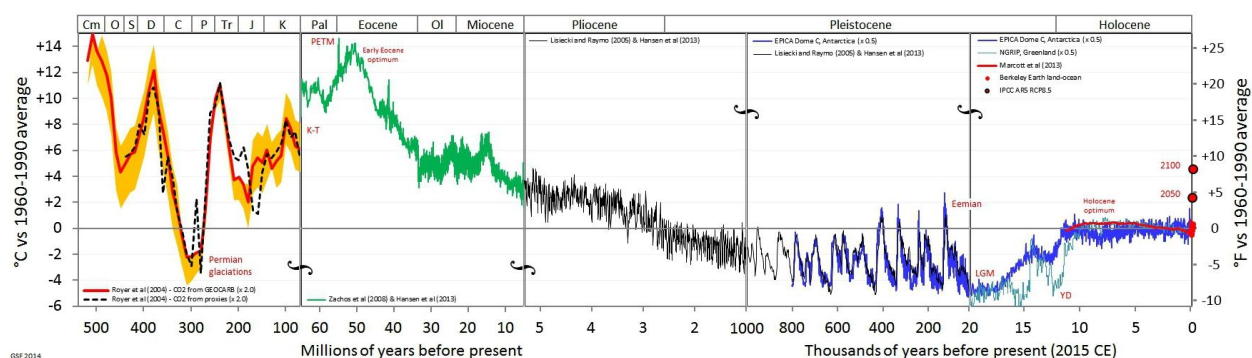


Рис. 7 – Изменение глобальной температуры атмосферы Земли за последние 500 миллионов лет

Кроме того, и содержание кислорода в атмосфере тогда тоже было выше примерно на 10 % (см. рис. 8, [27]). Стоит отметить, что значительно ранее, в палеозое, когда тоже было достаточно тепло, а содержание кислорода в атмосфере было раза в 1.5 выше, чем сейчас, существовал иной класс летунов беспрецедентных размеров – гигантские насекомые (см. рис. 8).

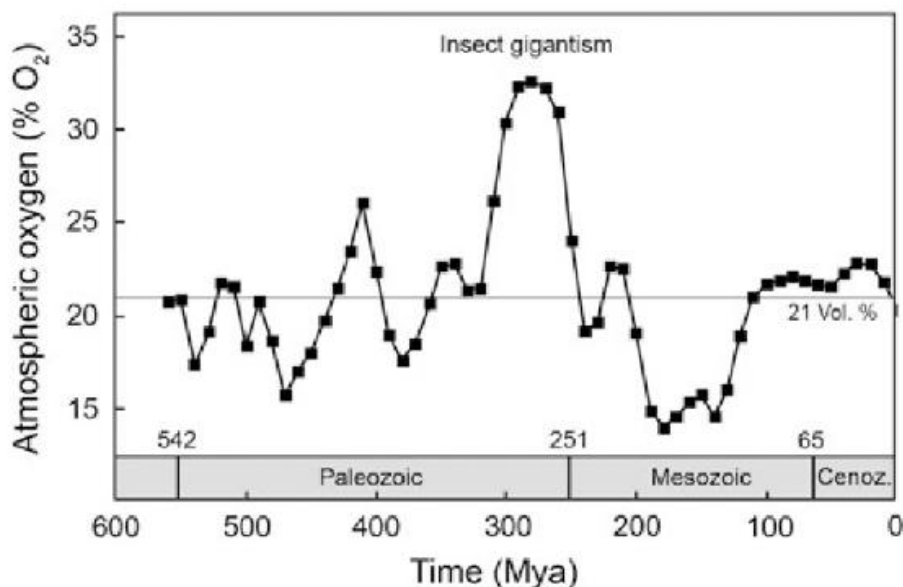


Рис. 8 – Изменение концентрации кислорода в атмосфере Земли за последние 500 миллионов лет

Все вместе это должно было приводить к тому, что удельная мощность птиц в миоцене могла быть выше современной раза в 1.5, то есть их взлетная мощность составляла около 30 Вт/кг. И это сдвинуло границу «махательного кризиса» вправо с увеличением массы самых крупных птиц примерно в 1.7 раза. Так

что птицы того времени относятся к современным, как велогонщики-чемпионы Армстронг и Контадор под действием допинга к пилотам мускулолетов Аллену и Каннелопулосу в их нормальном состоянии – там тоже было достигнуто превышение метаболизма примерно в 1.5 раза (см. раздел III). Потом, при снижении глобальной температуры Земли и содержания кислорода в атмосфере самые крупные ее летающие птицы стали мельчать до современного уровня.

Для машущего полета человека надо было бы поднять его энергетику, как минимум, еще в 1.5 – 2 раза по сравнению с миоценовыми птицами, то есть в 5 – 7 раз по сравнению с современным человеческим уровнем, что представляется, совершенно невозможным. Поэтому, в лучшем случае, человек мог бы совершать машущий полет где-нибудь на Луне (где уровень гравитации ниже в 6 раз) в условиях искусственной атмосферы, созданной внутри каких-нибудь огромных сооружений или внутренних полостей под ее поверхностью.

### Выводы

1. Удельная мощность, необходимая для совершения машущего полета и характерная для современных летающих существ, составляет около 10 Вт/кг, и 20 Вт/кг во время взлета.
2. При этих величинах удельной мощности масса совершающего машущий полет существа не может сколько-нибудь заметно превышать 15 кг.
3. Удельная мощность, развиваемая тренированным человеком, ниже этих уровней примерно в 2 – 2.5 раза.
4. Гигантские птицы миоцена летали потому, что их удельная мощность была примерно в 1.5 выше, чем у современных птиц, в основном, вследствие более высокой температуры атмосферы Земли того периода. При этом их масса доходила до 25 – 30 кг.
5. Удельная мощность, необходимая для совершения полета в атмосфере на крыле со стационарным обтеканием, определяется скоростью и, в зависимости от нее может изменяться от 2.5 Вт/кг до ~ 10 кВт/кг.
6. На Земле невозможен машущий полет человека за счет его собственных физических усилий, так как для этого, с учетом типичной массы его тела, необходимо увеличение его удельной мощности в 5 – 7 раз.

### Литература

1. Ю. И. Лобановский – Элементарная теория машущего полета. *Synerjetics Group*, ноябрь 2008 // [http://www.synerjetics.ru/article/flapping\\_flight.htm](http://www.synerjetics.ru/article/flapping_flight.htm)
2. Мощность, аэродинамика, эффективность, скорость и время. *XT – сообщество путешественников*, 2011 // <http://xt.ht/phpbb/viewtopic.php?f=27&t=50856&sid=0239694cbaba14dd1e8902a73e2c622a>
3. Мировые рекорды в тяжелой атлетике. *Википедия* // [https://ru.wikipedia.org/wiki/Мировые\\_рекорды\\_в\\_тяжёлой\\_атлетике](https://ru.wikipedia.org/wiki/Мировые_рекорды_в_тяжёлой_атлетике)
4. Разбор техники движения «Рывок штанги». *Тяжелая атлетика – ARMA SPORT* // [https://www.youtube.com/watch?v=RPSpG\\_44RKY](https://www.youtube.com/watch?v=RPSpG_44RKY)
5. Контадор, Альберто. *Википедия* // [https://ru.wikipedia.org/wiki/Контадор,\\_Альберто](https://ru.wikipedia.org/wiki/Контадор,_Альберто)
6. Армстронг, Лэнс. *Википедия* // [https://ru.wikipedia.org/wiki/Армстронг,\\_Лэнс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Армстронг,_Лэнс)
7. Семь с половиной минут славы для велосипеда с крыльями. Недолгая жизнь американского мускулолета. *Indicator. Технические науки*, 2008 // <https://indicator.ru/engineering-science/gossamer-kondor.htm>
8. Д. Кюхеман – Аэродинамическое проектирование самолетов. Москва, «Машиностроение», 1983.
9. Oswald efficiency number. *Wikipedia* // [https://en.wikipedia.org/wiki/Oswald\\_efficiency\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Oswald_efficiency_number)
10. MacCready Gossamer Condor. *Wikipedia* // [https://en.wikipedia.org/wiki/MacCready\\_Gossamer\\_Condor](https://en.wikipedia.org/wiki/MacCready_Gossamer_Condor)
11. HPA Technical drawings. *BHPFC* // <https://bhpfc.org.uk/hpa-technical-drawings/>
12. MIT Daedalus. *Wikipedia* // [https://en.wikipedia.org/wiki/MIT\\_Daedalus](https://en.wikipedia.org/wiki/MIT_Daedalus)
13. А. Сидоров – Новый полет Дедала. «Вокруг света», май 1989 // <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/4139/>
14. Rutan Voyager. *Wikipedia* // [https://en.wikipedia.org/wiki/Rutan\\_Voyager](https://en.wikipedia.org/wiki/Rutan_Voyager)
15. Consolidated B-24 Liberator. *Wikipedia* // [https://en.wikipedia.org/wiki/Consolidated\\_B-24\\_Liberator](https://en.wikipedia.org/wiki/Consolidated_B-24_Liberator)
16. Boeing B-29 Superfortress. *Wikipedia* // [https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_B-29\\_Superfortress](https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_B-29_Superfortress)
17. Albatross. *Wikipedia* // <https://en.wikipedia.org/wiki/Albatross>
18. Pelagornis sandersi. *Wikipedia* // [https://ru.wikipedia.org/wiki/Pelagornis\\_sandersi](https://ru.wikipedia.org/wiki/Pelagornis_sandersi)
19. Argentavis. *Wikipedia* // <https://en.wikipedia.org/wiki/Argentavis>
20. Летающие великаны. Зоологический форум // <https://forum.zoologist.ru/viewtopic.php?pid=520818>
21. А. Нелихов – Палеонтология с колокольни. *Книжный клуб. Рецензии*, июль 2020 // [https://elementy.ru/bookclub/review/5273897/Paleontologiya\\_s\\_kolokolni](https://elementy.ru/bookclub/review/5273897/Paleontologiya_s_kolokolni)

22. К. Ю. Еськов – Удивительная палеонтология. История Земли и жизни на ней. Москва, ЭНАС, 2008 // <http://mmtk.ginras.ru/pdf/Manuals&Classica/yeskov.2008.udivitel'naja.paleontologija.istorija.zemli.i.zhizni.na.nei.pdf>
23. Биохимия. 6.1 Термоллабильность. БСУ // [http://www.bsu.ru/content/page/1415/hecadem/biochemistry/p\\_5a\\_6\\_1.htm](http://www.bsu.ru/content/page/1415/hecadem/biochemistry/p_5a_6_1.htm)
24. Птицы. *Wikipedia* // <https://ru.wikipedia.org/wiki/Птицы>
25. Мелкие птицы почти перегреваются, когда кормят своих птенцов. Материалы портала «Научная Россия», май 2018 // <https://scientificrussia.ru/articles/melkie-ptitsy-pochti-peregrevayutsya-kogda-kormyat-svoih-ptentsov>
26. P. Lawn – Resolving the Climate Change Crisis. The Ecological Economics of Climate Change. SpringerNature, 2016 // <https://books.google.ru/books?id=HhSoCwAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=all+palaeotemps+wiki&source=bl&ots=vWU5UffSt0&sig=ACfU3U1AwdF7F6P4XUwEDH3dsDEzONWyyvg&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwjm4LLTuOnrAhXNIIsKHbeYCh4Q6AEwDHoECAIQAAQ#v=onepage&q=all%20palaeotemps%20wiki&f=false>
27. U. Kutschera, K. J. Niklas – Metabolic scaling theory in plant biology and the three oxygen paradoxa of aerobic life. *Theory in Biosciences*, 132 (4), August 2013 // [https://www.researchgate.net/publication/256189526\\_Metabolic\\_scaling\\_theory\\_in\\_plant\\_biology\\_and\\_the\\_three\\_oxygen\\_paradoxa\\_of\\_aerobic\\_life](https://www.researchgate.net/publication/256189526_Metabolic_scaling_theory_in_plant_biology_and_the_three_oxygen_paradoxa_of_aerobic_life)

Внутренняя Бока-Чика  
20.09.2020

Ю. И. Лобановский