

ПРОБ. 1380

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ
им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

ПРОВ 98

ПРОВ 2010

БИОЛОГИЯ МОРЯ

вып. 16

ФУНКЦИОНАЛЬНО-
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКТОННЫХ
ЖИВОТНЫХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКОВА ДУМКА»

КИЕВ — 1969

О МЕХАНИЗМЕ ПЛАВАНИЯ РЫБ И ДЕЛЬФИНОВ *

А.Ф. Кудряшов

Всесоюзное географическое общество

Механизм плавания рыб и дельфинов рассматривается нами не как гидродинамический парадокс /Craig, 1936/, а как частный случай механики спонтанно сформированных турбулентным потоком тел. Под спонтанно сформированными телами понимают тела, форма и поверхность которых деформируется синхронно с турбулентными возмущениями обтекающей их вязкой среды.

Чешуйный покров рыб является видоизменением панциря, который в процессе эволюции под влиянием локомоторных движений тела /Гринберг, 1950/ и турбулентных возмущений на границе с водной средой приобрел изломы и специфическое строение /Шулейкин, 1958; Алеев, 1963/.

Чешуйная поверхность состоит из отдельных чешуй, расположенных по телу рыбы в порядке, близком к шахматному, и образующих поперечные, продольные и косые ряды /Breaer, 1947/. Плано-вое расположение чешуй по поверхности тела рыб сравнительно точно описывается уравнением эволюты циклоиды /рис.1/:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= a(t_0 + \sin t_0) \\ y_1 &= -a(t - \cos t_0) \end{aligned} \right\}, \quad //$$

где x_1 - абсцисса; y_1 - ордината, совпадающая с направлением продольной оси боковой линии рыбы; t_0 - угол поворота окружности.

Отличительной особенностью чешуи костистых рыб является не только строение, но и способ ее крепления в кожном покрове. Закрытая часть каждой чешуи своим основанием внедрена в чешуйный кармашек, а открытая часть черепицеобразно налегает на соседние чешуи /Суворов, 1948; Галкин, 1958/. Кожный покров рыб легко деформируется, несмотря на наличие на нем развитой чешуи.

* Печатается в дискуссионном порядке.

Студенисто-эластичный эпидермис, покрывающий чешую, снабжен слизистыми клетками, выделяющими слизь /Berton, 1958/. Каждая чешуя имеет отдельный лимфатический сосуд и нервные волокна /Whitear, 1952; Чугунов, Ассман, Макарова, 1961/. У костистых рыб по верху большой боковой мышцы развита вдоль боковой линии прямая боковая поверхностная мышца, аналогичная поверхностной мышце у дельфинов /Суворов, 1948; Клейненберг, 1956; Томилин, 1957; Дилли, 1965/. Боковая линия рыб представляет собой систему трубочек, соединяющих водную среду с нервами. Эти трубочки /сейсмочувствительные органы/ играют роль своеобразных пьезометров, реагирующих на пульсации давления в водной среде. Посредством подачи нервного сигнала к боковой поверхности мышцы и волокнам соединительной ткани рыба может управлять поднятием и опусканием оснований чешуй, причем строение и расположение их позволяет обеспечивать незначительное перемещение соседних чешуй относительно друг друга. Это явление подтверждает проведенный автором опыт с лещом длиной 41 см и весом 1,8 кг. Лещ в живом состоянии был очищен от чешуи, а поверхность кожи смочена концентрированным раствором поваренной соли. Вследствие раздражений на поверхности тела рыбы появились продольно пульсирующие волны, распространявшиеся по всей высоте тела. Длина волн составляла две длины открытой части удаленной чешуи. Таким образом, рыбы производят автоматическое управление своим покровом в тесной связи с раздражениями, вызываемыми турбулентными возмущениями и пульсациями.

Безусловно представленные здесь доказательства этого явления требуют дополнительного подтверждения. Однако на основании приведенных выше результатов исследований представляется возможным предложить механизм работы чешуйной поверхности рыб /рис. I/ и допустить, что эластичный покров дельфинов /Соколов, 1955/ работает аналогично чешуйному покрову рыб. Под воздействием пульсаций давления обтекающего турбулентного потока, которые воспринимаются боковой линией рыбы, чешуйная поверхность выгибается без изгибов отдельных чешуй, образуя в продольном и поперечном разрезах волны определенных размеров. Для образования волн на чешуйной поверхности достаточно лишь колебания кожного покрова т.е. его поднятия и понижения, что обеспечивается соответствующими органами рыб. На рис. I поднятие чешуйного кармашка и частей отдельных чешуй обозначено знаком /+/, понижение - знаком /-/.

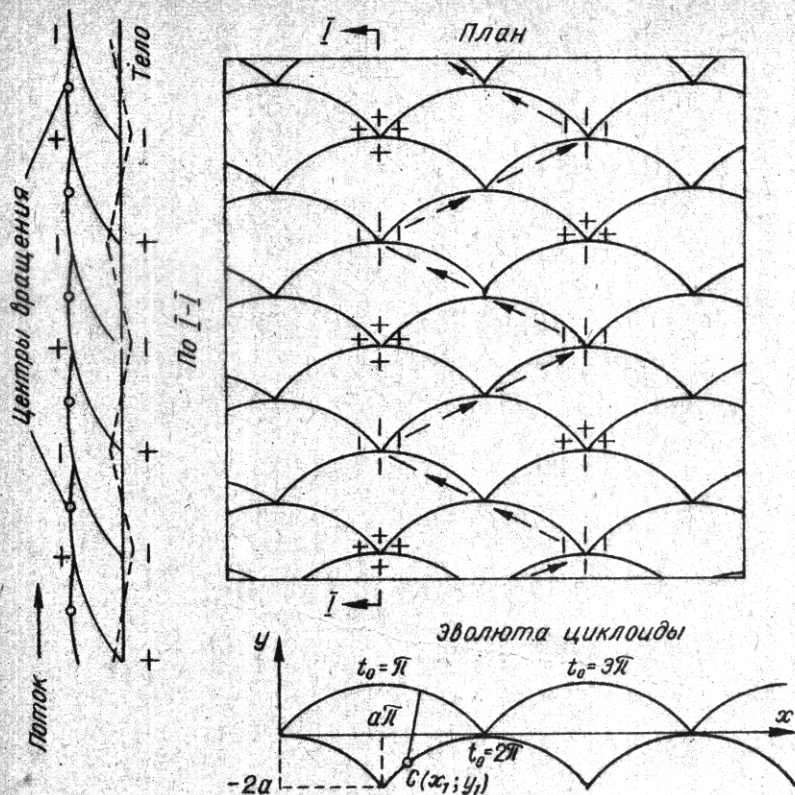


Рис. 1. Механизм работы чешуйной поверхности рыб и форма кривой, описывающей плановое расположение чешуй.

Предложенный механизм работы чешуйной поверхности обеспечивает одну из основных особенностей явления – распространение бегущих по длине поверхности волн определенных размеров, соответствующих турбулентным возмущениям обтекающего потока. Строение кожного покрова дельфина позволяет надеяться, что аналогичные бегущие волны распространяются и по покровам дельфина. Однако строение мышц кожного покрова дельфинов и чешуйной поверхности рыб не может обеспечить активного воздействия бегущих волн на обтекающую водную среду. Поэтому за каждой бегущей волной, в ее

впадине, образуется вихревая зона, которая тормозит движущееся в воде тело. Во избежание этого торможения тело рыб и дельфинов совершает синхронно с работой хвостового плавника вращательные движения вокруг продольной оси. При таких вращательных движениях вихревые зоны перемещаются из впадины одной бегущей волны во впадину нижерасположенной соседней волны и далее зигзагообразно по телу /рис.1/. Наличие вращательных движений вокруг продольной оси доказано материалами киносъемок как: у рыб /Magnan et Sainte-laguë, 1929; Gray, 1933/, так и у дельфинов /Шулейкин, 1953, 1965/, рис. 2.

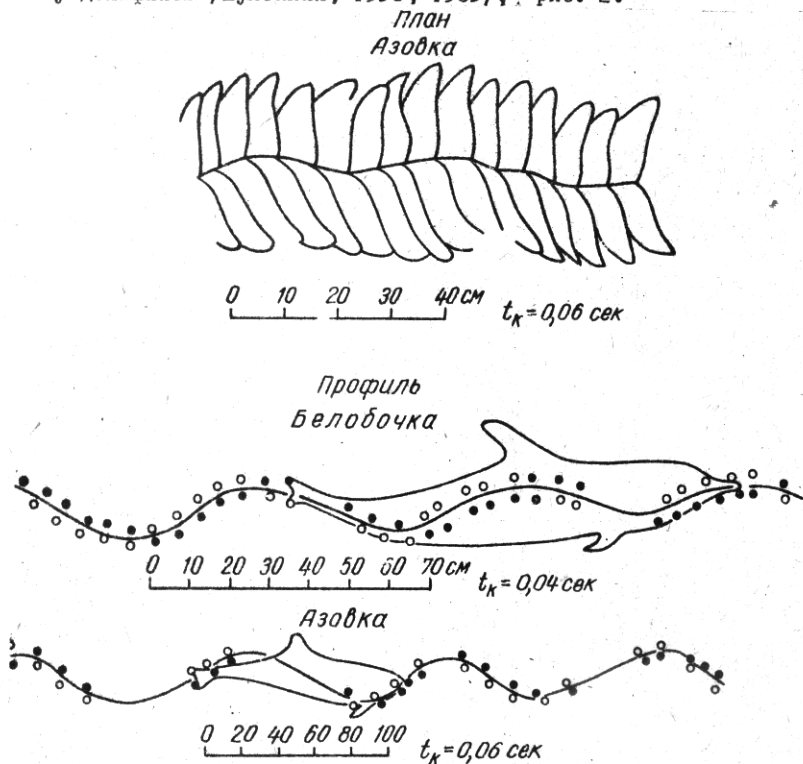


Рис. 2. Траектории движений хвостового плавника дельфинов по совмещенным кадрам киносъемки автора / t_K — интервал времени между кадрами/.

* В источниках, на которые ссылается автор /Magnan et Sainte-Laguë, 1925; Gray, 1933; Шулейкин, 1953, 1965/, наличие этих вращательных движений инструментально не показано и в работах о них ничего не говорится. Материалы тотальных неспе-

Перемещение вихревых зон осуществляется на поперечное расстояние, равное у рыб ширине открытой части чешуи δ_r . За период полного удара хвостового плавника боковые поверхности тела совершают два вращательных движения в разные стороны. Средняя окружная скорость вращения боковой поверхности рыб будет

$$V_{окр} = \frac{2 \cdot \delta_r}{t}, \quad /2/$$

где t - время, в течение которого совершается один полный удар хвостового плавника, вычисленное по формуле Бэйнбриджа /Bainbridge, 1937/:

$$V = \frac{1}{4} \cdot L(3 \cdot f - 4), \quad /3/$$

где V - скорость рыбы, $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$; L - длина тела до конца позвоночного столба, см; f - количество полных ударов хвостового плавника в 1 сек. На различных участках тела рыб окружная скорость вращения вокруг продольной оси различна, здесь $V_{окр}$ определено для наибольшего поперечного сечения тела рыбы, на половине его высоты.

В качестве относительной окружной скорости вращения боковой поверхности рыб нами принимается отношение наибольшей инструментально замеренной поступательной скорости /Барсуков, 1960;

специализированных киностеоек, имеющиеся в этих источниках для суждения о наличии предполагаемых вращательных движений, совершаемых якобы телом рыб и дельфинов, не могут быть использованы. Вращательные движения, совершаемые хвостом дельфина, закрепленного на специальном сухом стенде в воздушной среде /Шулейкин, 1953/, которые, видимо, имеет в виду автор, не могут быть связаны с представлением о нормальных локомоторных движениях дельфина в естественных условиях, где, как известно /Томилин, 1957/, эти движения состоят из дорсовентральных изгибов тела без примеси каких-либо вращательных движений. В силу этого замечание автора о наличии указанных вращательных движений следует считать гипотетичным, как и нижеследующие теоретические построения, вытекающие из этой гипотезы. /Прим. ред./.

Честной, 1961; Протасов, 1964/ к окружной, т.е. $\frac{V_{max}}{V_{окр}}$.
 Определить этим же путем относительную окружную скорость вращения боковой поверхности дельфинов трудно из-за отсутствия значений δ_r . Однако значения V_{max} и t могут быть вычислены по формуле автора:

$$V = 5,78 \cdot 10^6 \cdot \nu \cdot f^3 \sqrt{\frac{L}{g^3}}, \quad /4/$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости воды; g - ускорение силы тяжести; L - длина дельфина до развилки хвостового плавника.

Эмпирическая формула /4/ получена нами в результате анализа наблюдений /Клейненберг, 1956; Томили, 1957; Bang, 1960; Лилли, 1965/ за дельфинами разных пород. Из формул /3/ и /4/ видно, что при одинаковых длине тела и частоте ударов хвостовым плавником скорость дельфинов примерно в три раза больше скорости рыб. Это можно объяснить меньшей шероховатостью тела дельфинов, чем рыб. За меру шероховатости d_δ у рыб принимается расстояние между склеритами или шипиками на поверхности чешуи. Считают, что студенисто-эластичный эпидермис, покрывающий чешую, прогибается на склеритовых ребрах и шипиках под воздействием обтекающих тело турбулентных возмущений, образуя неровности, с которых поток сносит выделяемые эпидермисом частицы слизи. В качестве d_δ у дельфинов рассматривается средняя крупность выделений поверхностного слоя эпидермиса, которые в виде чешуек поступают в пограничный слой потока.

С увеличением динамической характеристики рыб окружная скорость $V_{окр}$ / в процентах от V_{max} / уменьшается тем интенсивнее, чем меньше шероховатость d_δ их чешуйной поверхности /рис. 3/. В качестве динамической характеристики рыб рассматривается отношение $\frac{V_{max}}{2g \cdot \delta^*}$, где $\delta^* = \frac{V_{max}}{2g} + \theta$;

θ - половина наибольшей ширины тела. На основании анализа материалов наблюдений установлено, что с увеличением $\frac{V_{max}}{V_{окр}}$ и относительно удлинения тел $L/R_{\delta,n}$ шероховатость покрова рыб уменьшается /рис. 4 и таблица/. Здесь $R_{\delta,n}$ - радиус боковой поверхности рыб и дельфинов в наибольшем поперечном сечении тела. Выделяя на рис. 4 экземпляры рыб, плавающих с наибольшей затратой мощности и в наиболее выгодном гидромеханическом режиме в смысле быстроходности и маневренности, получим для них

$$V_{окр} = \frac{V_{max}}{20(L/R_{\delta,n})^3} \quad (5)$$

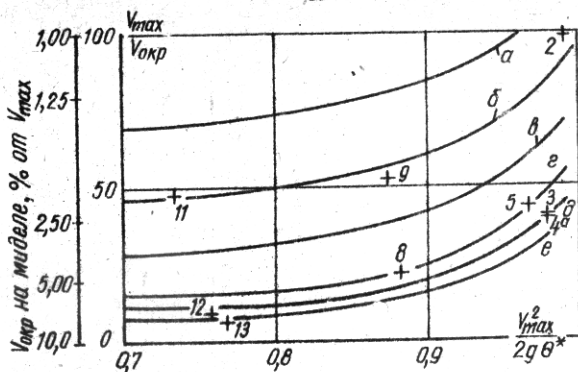


Рис.3. Зависимость относительной окружной скорости вращения тела рыб от динамической характеристики их поступательного движения и различной шероховатости их покровов: а - $d_\delta = 0,002$ см; б - $0,0026$; в - $0,003$; г - $0,0036$; д - $0,04$; е - $0,005$ см.

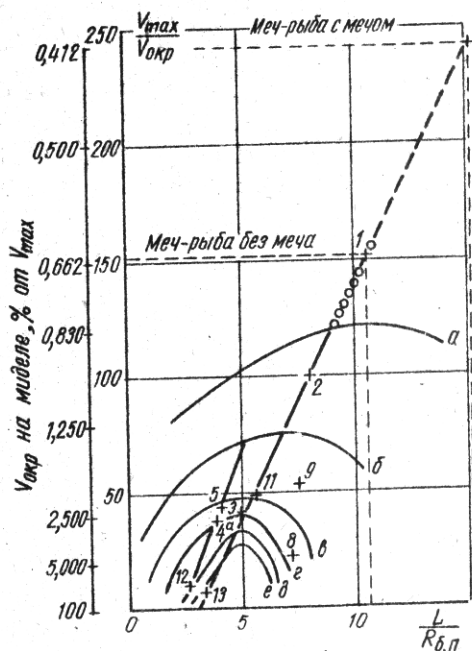


Рис.4. Зависимость относительной окружной скорости вращения корпуса рыб и дельфинов от удлинения их тел и шероховатости покровов:

/+/-/ - рыбы, /о/ - дельфины; а - $d_\delta = 0,002$ см;
б - $0,0025$; в - $0,003$; г - $0,004$; д - $0,005$; е - $0,006$ см.

Рыбы и дельфины

	Длина тела у рыб - до конца позвоночного столба, у дельфинов - до развилки хвоста, L, см	Половина наибольшей ширины тела, B, см	Наибольшая скорость плавания, V _{max} , см/сек	Ширина открытой части чешуи на половине вы- соты тела в наиболь- шем поперечном сече- нии рыб, B _ч , см	Расстояние между скле- ритами на окончании открытой части чешуи на половине высоты те- ла в "миндальном сече- нии", d _с , см
Меч-рыба-Xiphias gladius	с мечом 149,0 без меча 104,0	9,85 9,85	3000 3000	Чешуя отсутст.	Склеритов нет
Тунец-Thunnus thunnus	192,0	21,60	2000	0,660	0,00240
Красная-Оncorhynchus nerka	48,0	2,70	500	0,406	0,00400
Лосось черноморский-Salmo trutta labrax	96,5	8,00	842	0,868	0,00380
Семга-Salmo salar	45,5	1,70	320	0,480	0,00300
Кумжа-Salmo trutta	38,0	1,65	800	0,290	0,00360
Карась-Carassius auratus	18,0	1,30	169	0,800	0,00342
Шпрот-Sprattus sprattus balticus	8,5	0,45	75	0,280	0,00305
Судак-Lucio-perca lucio-perca	37,5	2,20	180	0,520	0,00360
Пикша-Melanogrammus aeglefinus	25,0	1,45	140	0,150	0,00267
Сельдь атлантическая-Clupea harengus harengus	30,0	1,90	200	0,500	0,00232
Форель-Salmo irideus	12,0	0,90	70	0,080	0,00257
Лещ-Abramis brama	23,5	1,50	96	0,750	0,00421
Карась-Carassius auratus	7,8	0,75	70	0,400	0,00655
Дельфин-белобочка-Delphinus delphis ponticus	176,0	15,00	12,50	Покров	0,00180*
Дельфин-азовка-Phocaena phocaena relicta	111,0	12,70	1100	эластич- ный	0,00180*

Примечание: Измерения проведены в Зоологическом институте
института АН УССР.

* - Средняя крупность выделений эпидермиса.

Радиус боковой поверхности в наибольшем поперечном сечении тела $R_{\delta n}$, см	Количество полных ударов хвост. плавника в одну секунду, f , уд/сек.	Время, в течение которого совершается один полный удар хвостового плавника, t , сек/уд.	Относительное удлинение тела, $\frac{L}{R_{\delta n}}$	Окружная скорость вращения боковой поверхности тела "на миделе" при $\frac{2 \cdot \delta y}{t} = V_{окр}$, см/сек	$\frac{V_{max}}{V_{окр}}$	$V_{окр}$, % от V_{max}
9,8	28,20	0,0354	15,13	-	-	-
9,8	-	-	10,56	-	-	-
24,0	15,20	0,0657	8,0	20,10	99,50	1,005
9,6	15,20	0,0657	4,98	12,35	40,50	2,470
25,0	18,00	0,0768	3,86	22,60	37,25	2,680
9,9	10,70	0,0933	4,58	10,30	31,06	3,220
9,4	11,86	0,0843	4,04	6,90	43,60	2,300
3,3	18,66	0,0536	3,89	29,60	5,66	17,630
1,6	18,10	0,0763	5,42	7,34	10,22	9,790
5,3	7,73	0,1292	7,08	8,05	22,34	4,470
3,3	8,80	0,1135	7,46	2,64	53,00	1,885
4,2	10,22	0,0978	7,20	10,22	19,56	5,110
2,1	9,10	0,1100	5,59	1,46	48,06	2,085
9,0	6,78	0,1472	2,60	10,18	9,44	10,610
2,4	13,30	0,0751	3,26	10,60	6,56	15,130
15,0	3,56	0,2810	11,10	-	-	-
12,7	3,65	0,2740	8,73	-	-	-

Из формулы /5/ можно определить $V_{окр}$ для дельфинов и меч-рыбы по относительному удлинению их тел и V_{max} . В случае утери меча меч-рыба должна увеличивать $V_{окр}$ с 0,412 до 0,662% от V_{max} .

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А л е е в Ю.Г. Функциональные основы внешнего строения рыбы. Изд-во АН СССР, М., 1963.
- Б а р с у к о в В.В. Скорость движения рыб.- Природа, 8, 1960.
- Г а л к и н Г.Г. Атлас чешуи пресноводных костистых рыб.- Изв. ВНИОРХ, 46, 1958.
- Г р и н б е р г М.М. О зависимости размеров чешуи костистых рыб от формы тела и характера движения.- Зоологический журнал, 29, вып. 5, 1950.
- К л е й н е н б е р г С.Е. Млекопитающие Черного и Азовского морей. Изд-во АН СССР, М., 1956.
- Л и л л и Д. Человек и дельфин. "Мир", М., 1965.
- Р а д а к о в Д.В., П р о т а с о в В.К. Скорости движения и некоторые особенности зрения рыб. Справочник. "Наука", М., 1964.
- С о к о л о в В.Е. Структура кожного покрова некоторых китообразных. Бюлл. Моск. об-ва испытателей природы, 60, 7, 1955.
- С у в о р о в Е.К. Основы ихтиологии. "Советская наука", 1948.
- Т о м и л и н А.Г. Китообразные. Изд-во АН СССР, М., 1957.
- Ч е с т н о й В.Н. Максимальные скорости движения рыб. "Рыбное хозяйство", 9, 1961.
- Ч у г у н о в а Н.И., А с с м а н А.В., М а к а р о в а Н. Рост и динамика жирности у рыб. - В кн.: Тр. Ин-та морфологии животных, 39, 1961.
- Ш у л е й к и н В.В. Физика моря. Изд-во АН СССР, М., 1953.
- Ш у л е й к и н В.В. Энергетика движущейся рыбы. - ДАН СССР, отд. техн. наук, 163, 3, 1965.
- B a i n b r i d g e R. Caudal fin and body movement in the propulsion of some fish.- J. Exp. Biol., 40, 1937.
- B e r t o n L. Traite de Zoologie, 13, 1, 1958.
- B r e d e r C.M. An analysis of the geometry of symmetry with especial reference to the squamation of fishes.- Bull. Amer. Mus. Nat. Hist. N. Y., 88, 6, 1947.

- Gray I. Studies of Animal Locomotion.- J. Exp. Biol., 10, 1933.
- Gray I. Studies of Animal Locomotion.- J. Exp. Biol., 13, 1936.
- Land I.G. Naval Hydrodynamics, 9, 1960.
- Magnan A., Sainte-Laqu   A. Essai de theorie du poisson. Services techniques de l'aeronautique.- Bull. Technique, 58, V. Paris, 1929.
- Whitear M. The innervation of the skin of teleost fishes.-Quart. J. Micr. Sci., 93, 1952.