

Российская академия наук

Институт проблем
экологии и эволюции
им. А. Н. Северцова
Научный совет
по проблемам биосферы



Российский комитет
по программе ЮНЕ-
СКО
“Человек и биосфера”

Виды
фауны России
и сопредельных
стран

Северный морской котик

Систематика
Морфология
Экология
Поведение



2.2. Смачиваемость волосяного покрова

Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о том, что волосяной покров некоторых земноводных млекопитающих, и в частности северных морских котиков, не промокает в воде и сохраняет воздушную прослойку очень долго [Гудкова-Алексеева, 1951; Соколов, 1960, 1973; Белькович,

1962; Мараков, 1974]. Считается, что сохранение воздуха обусловлено гидрофобностью волос и их исключительной густотой. Гидрофобность волосяного покрова, по мнению авторов, обеспечивается главным образом за счет смазывания его секретами сальных и потовых желез. Такое объяснение, вполне логичное по своей сути, тем не менее является гипотетическим и нуждается в экспериментальной проверке. Прежде всего необходимы количественные оценки толщины воздушной прослойки, а также лабораторные исследования смачиваемости волос.

Лишь в одной работе [Романенко, Соколов, 1986] дана количественная экспериментальная оценка толщины воздушной прослойки в волосяном покрове котика. В этой работе подопытную молодую самку (около 3 лет) до эксперимента длительное время (7 мес) содержали в условиях закрытого помещения с бассейном размером 3*2* 1 м³, в котором она могла плавать. Бассейн был наполнен пресной водой, которая обновлялась несколько раз в сутки. Эксперимент проводили в апреле, при этом температура воды варьировала от +15° до +17°С.

На поверхность сухого волосяного покрова животного в области спины (ближе к шее) был приклеен клеем “Циакрин” грифель чернильного карандаша длиной 1.5 см. Во время плавания животного вода растворяла грифель, и красящее вещество вместе с нею проникало вглубь волосяного покрова, окрашивая его. Место прикрепления грифеля было выбрано с таким расчетом, чтобы, по возможности, затруднить животному почесывание грифеля лапами. Пробы волос были взяты (выстрижены) после полного высыхания животного на третьи сутки от начала эксперимента с пяти участков тела. Первый участок (контрольный) был выбран на шее, вне области окрашивания (выше грифеля по потоку). Второй участок был взят на 3 см ниже по потоку относительно места прикрепления грифеля. Третий, четвертый и пятый — были выбраны на расстоянии в 10, 15 и 25 см, соответственно, от второго участка вниз по потоку.

Анализ проб показал, что краска проникла на значительную глубину, но тем не менее часть волосяного покрова, прилегающая непосредственно к коже животного (толщиной 2—5 мм), осталась неокрашенной на всех участках, находившихся в зоне возможного окрашивания. Вероятно, окрашиванию препятствовала воздушная прослойка, содержащаяся в волосяном покрове, хотя это могло произойти и из-за обильной жировой смазки на волосе, если бы таковая присутствовала, что, однако, маловероятно.

Толщина воздушной прослойки должна, по-видимому, изменяться в широких пределах в зависимости от условий, в которых обитает животное. Очевидно, она должна определяться в первую очередь глубиной погружения котика под воду, так как от глубины зависит гидростатическое давление. Наши наблюдения показали, что при входе котика в воду и погружении до глубины 5—6 м весь волосяной покров насыщен воздухом. В это время

за плывущим животным тянется шлейф воздушных пузырьков. При погружении до глубины 10—12 м воздух продолжает выделяться из волосяного покрова на изреженных или нарушенных участках. Такими участками являются слабооволосенные части ластов, ушных раковин, примятый волосяной покров под сбруей с закрепленными на ней приборами.

При плавании животного на глубине 12—30 м воздух из волосяного покрова не выделяется. Однако прекращение выделения воздуха не свидетельствует о том, что волосяной покров не содержит воздушной прослойки. При искусственном нарушении целостности покрова (при прочесывании) воздух с этих участков продолжает выделяться. Даже на глубине 30 м (при избыточном давлении воды 3 кг/см²) в волосяном покрове котика еще присутствует воздух.

Заметное влияние на толщину воздушной прослойки несомненно должно оказывать загрязнение волосяного покрова, сказывающееся прежде всего на его способности удерживать воздух. Должны влиять также разного рода травмы, нарушающие целостность волосяного покрова животного.

К сожалению, лабораторные исследования смачиваемости волос северного морского котика ранее не проводились.

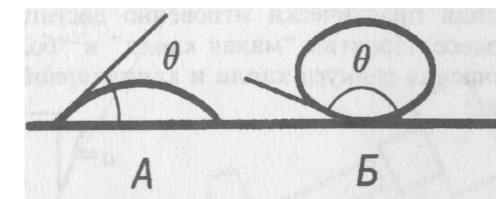
Количественной мерой смачиваемости твердого тела жидкостью является величина так называемого краевого угла, образуемого границей жидкости и поверхностью тела. Проще всего крайевой угол можно наблюдать при нанесении капли жидкости на поверхность твердого тела. На рис. 36 крайевой угол обозначен через θ . Если $0 < \theta < 90^\circ$, тело хорошо смачивается жидкостью; чем меньше угол θ , тем лучше смачивание, и, наоборот, чем он больше, тем смачивание хуже. Если $\theta > 90^\circ$, считается, что тело плохо смачивается.

Физически смачивание обусловлено взаимодействием молекул смачивающей жидкости и смачиваемого твердого тела. Если силы межмолекулярного взаимодействия внутри жидкости меньше сил взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела, то говорят, что жидкость хорошо смачивает его, и наоборот. Пример хорошего смачивания дают чистое стекло и вода; пример плохого — парафин и вода.

Существуют два основных метода наблюдения и измерения величины краевого угла как меры смачивания. Один метод (метод капли) связан с нанесением капли исследуемой жидкости на поверхность исследуемого твердого тела (рис. 36). В этом случае не трудно измерить крайевой угол, наблюдая в микроскоп за формой капли. Другой метод (метод погружения) состоит в погружении исследуемого тела в исследуемую жидкость и наблюдении за формой границы жидкости у поверхности тела. В этом случае также может быть измерен крайевой угол, образуемый границей жидкости и поверхностью тела.

Рис. 36. Капля жидкости на поверхности смачиваемого (А) и несмачиваемого (Б) твердого тела:

θ — крайевой угол.



В работе С. Н. Ивановой и Ю. Ф. Ивлева [1985] предпринята попытка количественного изучения степени смачиваемости отдельных волосков некоторых млекопитающих (водяная полевка, серая крыса, бобр, северный олень и др.) методом погружения их в воду в режиме оттеkania жидкости. Под режимом оттеkania жидкости здесь имеется в виду режим, при котором уровень жидкости, в которую погружен волос, непрерывно понижается, в частности за счет высыхания. При этом измеряли величину краевого угла, образуемого между границей жидкости и поверхностью волоса.

Возможны еще два режима измерения краевого угла, неиспользованные в упомянутой работе: режим стационарного уровня и режим натекания жидкости. В первом режиме уровень жидкости постоянен, во втором — уровень жидкости повышается. Каждому режиму, вообще говоря, соответствует свое значение краевого угла, причем эти значения могут очень сильно различаться. Это значит, что характеристики смачивания твердого тела зависят от направления движения границы жидкости по поверхности тела: если граница движется в направлении еще не смоченного участка поверхности тела, то крайевой угол имеет, как правило, большую величину (смачиваемость хуже), чем когда граница жидкости отодвигается назад по уже смоченной поверхности. В последнем случае создается впечатление лучшей смачиваемости. Особенно это явление хорошо заметно на шероховатой поверхности.

Методика погружения, использованная в упомянутой работе, обладает серьезными недостатками: недостаточно четко просматривается в микроскоп граница перехода от воды к поверхности волоса, особенно если волос плохо смачивается водой. Трудно манипулировать очень тонкими волосами типа пуховых, толщина которых порядка 7—10 мкм; трудно обеспечить режимы стационарного уровня и натекания; достаточно долго устанавливается равновесное положение уровня жидкости.

В наших исследованиях смачиваемости волос северного морского котика была использована метод малой капли, помещаемой на отдельный волос [Щербаков, Рязанцев, 1965]. Удобство этого метода состоит в том, что при достаточно малых размерах капли гравитационная сила не влияет на величину краевого угла, что характерно для методики, в которой достаточно крупная капля наносится на поверхность твердого тела. При малых размерах

капли практически мгновенно достигается равновесное ее положение на волосе. Понятия “малая капля” и “большая капля” определяются из соотношения радиуса капли и капиллярной постоянной Лапласа, которая имеет вид:

$$a = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}, \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, ρ — ее плотность, g — ускорение силы тяжести. Если радиус капли $R < a$, то каплю можно считать “малой”; если же $R > a$, то капля “большая”.

Принимая, что для воды $\sigma = 73$ эрг/см², $\rho = 1$ г/см³ и $g = 980$ см/с², нетрудно подсчитать по формуле (7) постоянную Лапласа, которая окажется равной 0.38 см. Это значит, что капля воды радиусом менее 0.38 см уже может считаться малой.

В нашем варианте метод малой капли заключается в осаждении микроскопически малых капель воды (диаметром 50—300 мкм) с помощью пульверизатора на отдельном волосе и одновременном их фотографировании с помощью фотоприставки или кинокамеры через микроскоп. На рис. 37 показана схема установки для исследования смачиваемости волос методом малой капли. Отдельный волос 1 закрепляли на специальном держателе в натянутом состоянии и располагали в поле зрения микроскопа 2 с фотоприставкой 3. Освещение исследуемого образца осуществляли осветителем 4 через матовое стекло 5 таким образом, чтобы свет попадал точно в объектив микроскопа (наблюдение и фотосъемка в проходящем свете), в установке был использован микроскоп типа МБС-2, обладающий длиннофокусным объективом и обеспечивающий увеличение почти в 90 раз.

Метод малой капли позволяет изучать смачиваемость волос (измерять краевой угол) в режимах оттекания, стационарного уровня и натекания жидкости. Режим оттекания осуществляли следующим образом: наносили малую каплю на волос с помощью пульверизатора, затем фотографировали ее несколько раз с интервалами в несколько секунд. За это время капля уменьшалась в размерах в результате высыхания, которое и обеспечивало режим оттекания. Режим стационарного уровня создавали при одновременном осаждении капель и их фотографировании, когда процесс высыхания еще не успевал привести к уменьшению размеров капли. Режим натекания жидкости осуществляли путем многократного осаждения капель на волосе, когда какая-либо капля заметно росла в размерах за счет попадания на нее дополнительных капель из облака, создаваемого пульверизатором. Процесс роста капли фиксировали фотоаппаратом, а еще лучше с помощью кинокамеры.

Рис. 37. Схема установки для исследования смачиваемости волос методом малой капли:

- 1 — отдельный волос,
- 2 — микроскоп,
- 3 — фотоприставка,
- 4 — осветитель,
- 5 — матовое стекло.

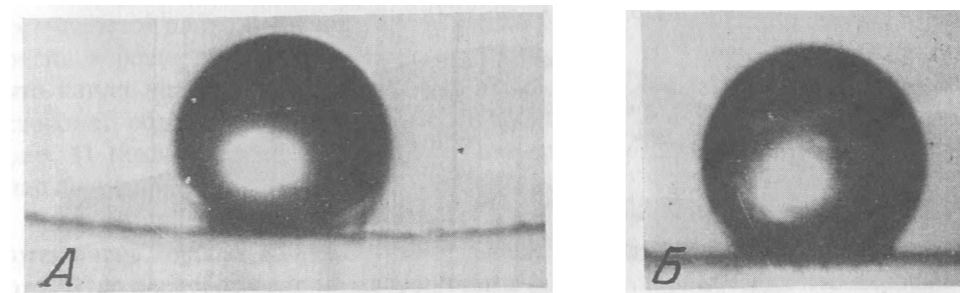
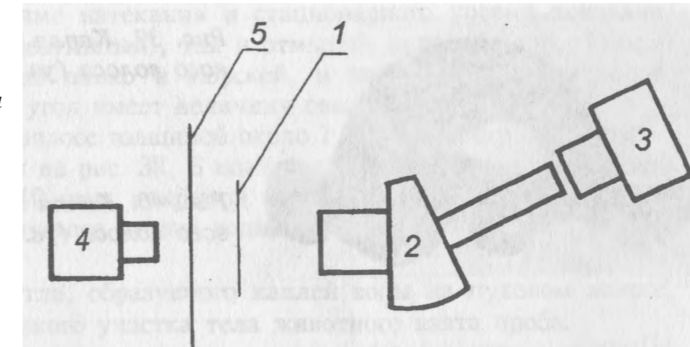


Рис. 38. Капля воды на пуховом волосе северного морского котика (А) и на стеклянной нити, покрытой слоем парафина (Б)

Измерение краевого угла, образуемого на границе раздела капли и волоса, производят на фотоотпечатках известными способами [Щербаков, Рязанцев, 1965; Зимон, 1974].

В целях проверки работоспособности и корректности примененной методики были измерены краевые углы, образованные малой каплей дистиллированной воды на тонкой (диаметром 10 мкм) прокаленной стеклянной нити и на той же нити, покрытой слоем парафина. Как уже сообщалось выше, чистое стекло хорошо смачивается водой (краевой угол намного меньше 90°), а парафин — плохо (краевой угол больше 90°). Измерения показали, что в первом случае краевой угол составил около 20°, а во втором — около 130°. Эти результаты хорошо согласуются с известными данными и свидетельствуют о корректности описанной методики.

Выше уже отмечалось, что одна из возможных причин гидрофобности волосяного покрова северного морского котика заключается в смазывании волос секретом сальных и потовых желез. Поэтому для выяснения роли г м и т т п т т н р естественно поовести изучение смачиваемости волос в их

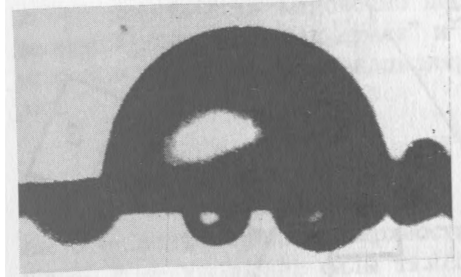


Рис. 39. Капля воды на ножке острого волоса (ув. *90)

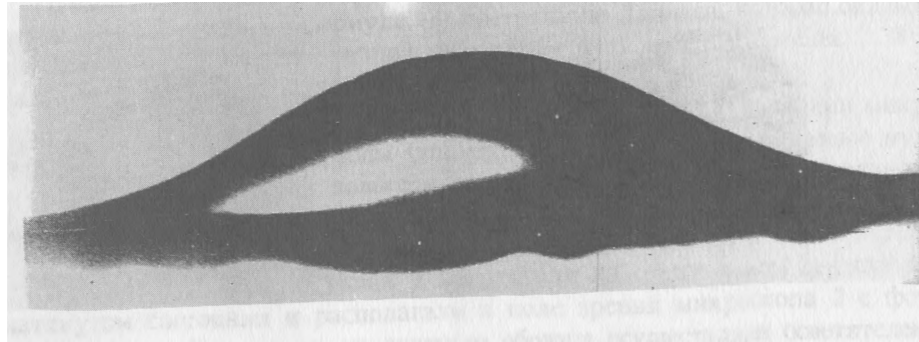


Рис. 40. Капля воды на гранне острого волоса (ув. *90)

натуральном виде (сразу же после взятия проб волос у животного), а затем волос, тщательно отмытых от возможно находящегося на них секрета. Именно в такой последовательности проводили исследования с помощью описанной выше методики. Пробы волос брали от самки, имеющей возраст около трех лет. Участки тела, с которых брали пробы, были расположены на границах волосяного покрова переднего и заднего правых лап, на спине, правом боку, животе, а также на голове (между глаз). Волосы выдергивали пинцетом и сразу же погружали в контейнеры с морской водой с целью предотвратить возможное высыхание секрета, имеющегося на волосе. Пуховые и остевые волосы закрепляли в поле зрения микроскопа (рис. 37), осаждали на них капли морской воды с помощью пульверизатора и производили фотосъемку образующихся капель. Интервал времени между взятием пробы и фотографированием составлял 3—5 мин. Затем волосы отмывали в течение нескольких часов (а иногда и суток) в этиловом спирте. Для контроля пользовались также стиральным порошком, шампунем и ацетоном.

тмытые волосы исследовали тем же методом, осаждая капли морской и дистиллированной воды.

Исследования в режиме натекания и стационарного уровня показали, что как натуральный (неотмытый), так и отмытый пуховой волос по всей длине смачивается очень плохо и морской, и дистиллированной водой. Максимальный краевой угол имеет величину около 130° . На рис. 38, Л — капля воды на пуховом волосе толщиной около 7 мкм; диаметр капли около 100 мкм. Для сравнения на рис. 38, Б показана капля воды на стеклянной нити диаметром около 10 мкм, покрытой тонким слоем парафина. Видно, что краевые углы, образуемые каплей воды в том и другом случае, близки по величине.

Величина краевого угла, образуемого каплей воды на пуховом волосе, не зависит от того, с какого участка тела животного взята проба.

Смачивание острого волоса неодинаково по его длине. “Ножка” волоса смачивается плохо; краевой угол — около 90° (рис. 39). Гранна смачивается очень хорошо, и краевой угол составляет около 20° (рис. 40). Тот факт, что капля не охватывает гранну со всех сторон, а находится на одной ее стороне, объясняется сильным уплощением гранны. Для сравнения на рис. 41 показана капля воды на тонкой прокаленной стеклянной нити без парафина диаметром около 10 мкм.

В режиме оттекания жидкости как пуховой, так и острого волоса смачиваются очень хорошо. Краевой угол в процессе высыхания капли уменьшается от 130° до пренебрежимо малой величины (рис. 42). При этом дистиллированная вода высыхает без остатка. Морская же вода при высыхании оставляет на волосе соль, которая облегчает в дальнейшем смачивание волоса в этом месте.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что пуховой волос северного морского котика, даже будучи тщательно отмытым от возможной смазки (секрета сальных и потовых желез), очень плохо смачивается водой. Это может быть обусловлено двумя причинами: во-первых, биохимическими свойствами самого волоса, во-вторых, значительной шероховатостью его поверхности.

О биохимических свойствах пухового волоса данных нет. Степень же шероховатости его поверхности хорошо видна на фотографии фрагмента волоса при большом увеличении (рис. 43).

Известно [Адамсон, 1979], что для шероховатой поверхности справедливо соотношение:

$$\cos \theta_{\text{каж.}} = r \cos \theta_{\text{ист.}}, \quad (2)$$

где r — коэффициент шероховатости, определяющийся отношением истинной площади поверхности к кажущейся, $\theta_{\text{каж.}}^{\wedge}$ — кажущийся краевой

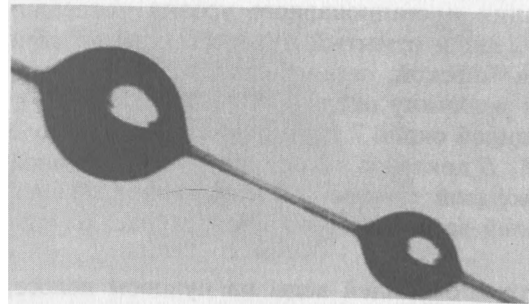


Рис. 41. Капля воды на прокаленной стеклянной нити без парафина (ув. *90).

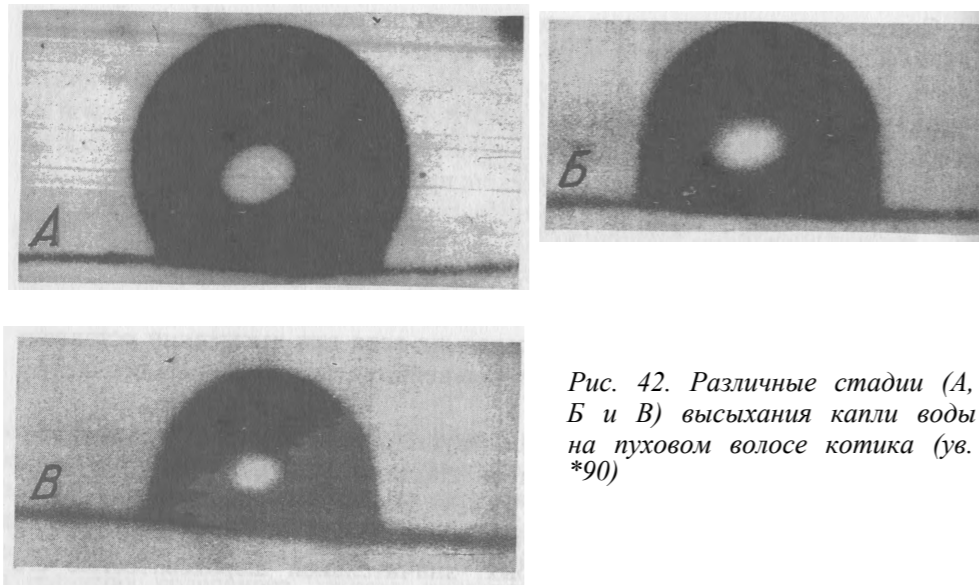


Рис. 42. Различные стадии (А, Б и В) высыхания капли воды на пуховом волосе котика (ув. *90)

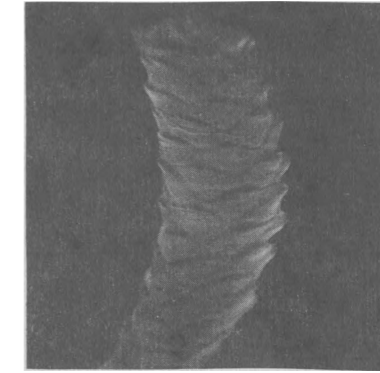
угол на шероховатой поверхности, $\theta_{ист}$ — истинный краевой угол, определяемый биохимическими свойствами материала. Для абсолютно гладкой поверхности $\varepsilon = 1$, для шероховатой всегда $\varepsilon > 1$.

Из соотношения (2) следует, что, если $\theta_{ист} < 90^\circ$, шероховатость поверхности приводит к уменьшению кажущегося краевого угла, а если $\theta_{ист} > 90^\circ$, то — к его увеличению.

Формула (2) справедлива при условии, что жидкость заполняет все впадины шероховатой поверхности. При этом она может запырять в неко-

Рис. 43. Кутикулярная структура поверхности пухового волоса котика.

Пуховые волосы имеют волнистую форму, светлые, тонкие, постоянной толщины по всему стержню или имеют два утолщения. Кутикулярные чешуи образуют колосовидный рисунок. У основания волоса чешуи вытянуты, рыхлые, а к вершине становятся более плотными. Поперечное сечение волоса эллипсоидное. Ув. *1000.



торых впадинах пузырьки воздуха. В этом случае (2) имеет несколько иной вид [Адамсон, 1979]:

$$\cos \theta_{\text{каж}} = \varepsilon \cos \theta_{\text{ист}} \quad \wedge \quad \theta_{\text{каж}} > \theta_{\text{ист}}$$

где f_j и f_2 — доли поверхности, которые соответственно, контактируют с жидкостью и воздушными пузырьками.

Наличие воздушных пузырьков во впадинах шероховатости волоса должно приводить, в соответствии с (2), к тому, что кажущийся (измеряемый) краевой угол будет еще значительно отличаться от истинного в большую сторону, чем это следует из (2).

К сожалению, нам не известны ни точное значение коэффициента шероховатости, ни факты наличия воздушных пузырьков во впадинах на поверхности волоса при вхождении котика в воду. Поэтому с полной уверенностью можно говорить лишь о том, что истинный краевой угол смачивания пуховой волоса северного морского котика составляет величину менее 130° . Реально же смачивание определяется кажущимся (измеренным) значением краевого угла, который в режиме натекания на пуховом волосе иногда достигает 130° .

Характеристики смачивания острого волоса, как и пухового, определяются его биохимическими свойствами и шероховатостью. Он имеет заметную шероховатость, хотя и значительно меньшую, чем пуховой (рис. 44). Однако, в отличие от последнего биохимические свойства острого волоса, по-видимому, неодинаковы по его длине, что и определяет различные характеристики смачивания на разных участках. Шероховатость в данном случае лишь подчеркивает эти различия. На биохимические различия грани и “ножки” острого волоса косвенно указывает различный их цвет.

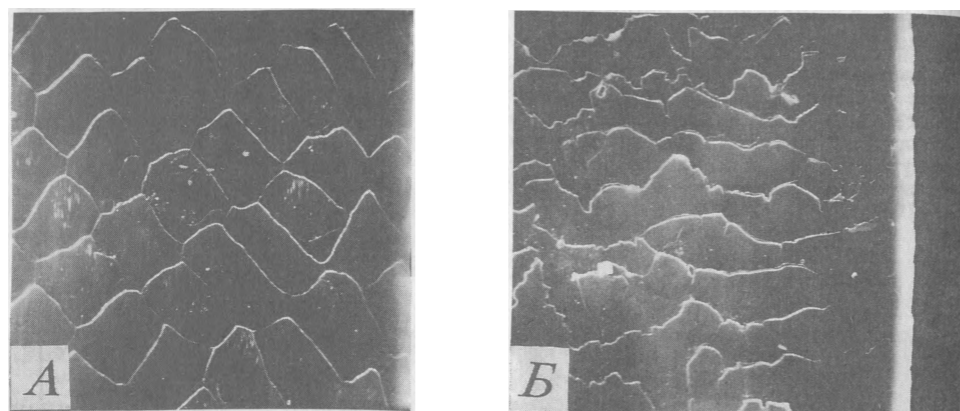


Рис. 44. Кутикулярная структура поверхности ножки (А) и грани (Б) остевого волоса.

Остевые волосы слегка изогнуты с сильно пигментированной гранной. Рисунок кутикулы чешуйчатый и изменяется вдоль стержня: в основании волоса чешуи вытянуты и образуют черепицевидный рисунок с вершинами, направленными к вершине волоса. Чешуи имеют треугольную форму и их ширина приблизительно а 2 раза меньше длины. По окружности стержня укладывается 10—11 чешуй. В области грани чешуи уплощаются, их ширина поперек волоса равна или а несколько раз больше высоты. По окружности стержня укладываются 3—7 чешуй. Края чешуй могут быть довольно гладкими или сильно изломанными. Поперечное сечение волоса эллипсоидное.

Хорошая смачиваемость грани, по-видимому, имеет адаптивный характер, так как является необходимым условием удержания воздушной прослойки в волосяном покрове. Качественно это можно проиллюстрировать с помощью рис. 45. На этом рисунке схематически показано, как грани остевых волос при погружении котика в воду прилегают друг к другу и образуют нечто подобное черепичной крыше над пуховыми волосами. Эта особенность остей уже отмечалась в литературе [Гудкова-Аксенова, 1951; Белькович, 1962; Соколов, 1973]. Назначение этой “крыши” не в том, чтобы препятствовать проникновению воды, а, наоборот, чтобы втягивать воду. Этому способствуют, кроме хорошей смачиваемости, весьма малые зазоры между отдельными граннами. Капиллярные силы, обусловленные капиллярным давлением в промежутках между граннами, направлены внутрь и втягивают воду (рис. 45). Попытка воздуха выйти из пухового покрытия через зазоры между граннами остевых волос предотвращается значительной величиной этих сил.

Нетрудно оценить величину этих сил. Будем для простоты рассматривать две соседние грани, лежащие друг на друге, как плоские пластинки,

погруженные в воду, расстояние между которыми очень мало. Тогда можно воспользоваться формулой:

$$P = \frac{2\sigma \cos\theta}{d}, \quad (4)$$

где P — капиллярное давление, θ — краевой угол, σ — коэффициент поверхностного натяжения воды, d — расстояние между пластинками (граннами). В (4) единственной неизвестной величиной является расстояние между граннами, которое безусловно мало. Можно предполагать, что это расстояние составляет величину порядка нескольких микрон, так как грани имеют слегка овальную форму в сечении и не во всех точках плотно примыкают друг к другу. Положив для определенности, что расстояние между граннами составляет 10 мкм, получим, что капиллярное давление между ними равно 1.46 ньютона.

Вода, втягиваясь в зазоры между граннами, доходит до места перегиба остей. Однако проникновению воды внутрь пухового покрытия противодействуют капиллярные силы, возникающие между пуховыми волосами и направленные наружу (рис. 45). Эти противодействующие силы (в зазорах между граннами и между пуховыми волосами) стремятся удержать границу воды в месте перегиба остевых волос. Такая картина должна наблюдаться при плавании котика у поверхности воды. При погружении на глубину внешнее гидростатическое давление преодолевает капиллярные силы пухового покрытия и загоняет воду внутрь него, несмотря на плохую смачиваемость пуха. Глубина проникновения воды в пуховое покрытие тем больше, чем глубже погружение, а, следовательно, чем больше гидростатическое давление. При погружении на большую глубину воздух из пухового покрытия либо будет выдавлен гидростатическим давлением через дефекты волосяного покрова, либо растворится в воде.

На рис. 45 показан случай загрязнения волосяного покрова посторонней частицей. Эта частица препятствует плотному прилеганию грани друг к другу в следствие чего резко уменьшается капиллярная сила, затягивающая воду внутрь. В результате воздух из пухового покрытия будет беспрепятственно выходить наружу, и воздушная прослойка не сохранится. Именно стремлением избавиться волосяной покров от грязи, вероятно, объясняются часто наблюдаемые процедуры чесывания котика лапами различных мест тела.

Степень смачиваемости волос котика в режимах натекания воды и стационарного уровня практически одинакова. Представляет интерес также смачиваемость в режиме оттекания. Изменения формы капли при переходе от режима стационарного уровня к режиму оттекания и в процессе последнего показаны на рис. 42. Изображенное изменение формы капли при высыхании связано с тем, что с поверхности она высыхает быстрее, чем

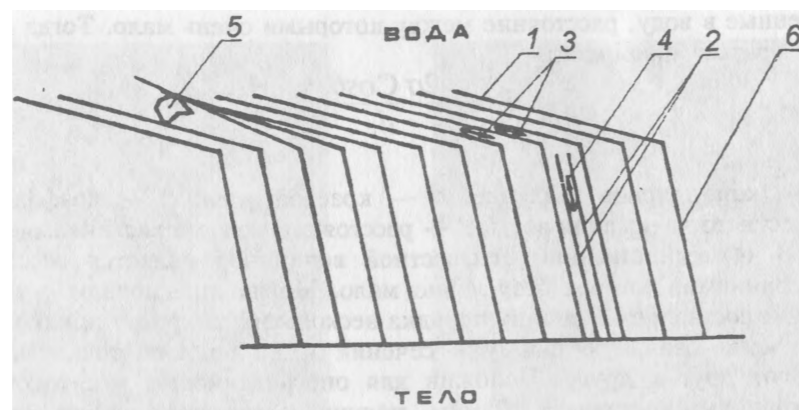


Рис. 45. Схематическое представление структуры волосяного покрова котики:
 1 — гранна остевого волоса, 2 — пуховой волос, 3 — капиллярные силы в зазорах между граннами, 4 — капиллярные силы в зазорах между пуховыми волосами, 5 — посторонняя частица, 6 — ножка остевого волоса.

смещается граница воды по поверхности волоса. Замедленное смещение границы обусловлено проникновением воды в пазухи кутикулы волоса и затрудненным ее высыханием. При этом создается впечатление хорошей смачиваемости, хотя в данном случае капля смачивает не столько сам волос, сколько воду, содержащуюся в пазухах кутикулы. Именно это явление наблюдали С. Н. Иванова и Ю. Ф. Ивлев [1985].

Иногда можно наблюдать скачкообразное смещение границы капли при высыхании. Это объясняется высыханием воды в одной из пазух кутикулы и внезапным переходом границы на следующую пазуху, заполненную водой.

При погружении северного морского котика в воду и выходе его из воды сменяются поочередно все режимы смачивания его волос. В первый момент погружения имеет место режим натекания и характерная для него очень плохая смачиваемость пухового волоса (гранна остевого волоса во всех режимах смачивается хорошо). Именно в этот период максимально соблюдаются все условия сохранения воздушной прослойки. Во время плавания на разных глубинах все три режима смачивания попеременно сменяют друг друга, но это не влияет на сохранность воздуха в толще волосяного покрова. При выходе котика из воды наблюдается режим оттекания жидкости, замедляющий до некоторой степени процесс освобождения волосяного покрова от воды. Именно поэтому, да еще потому, что гранны остевых волос хорошо смачиваются, вышедший из воды котик выглядит мокрым.