

## Рождение нового научного направления – биомеханика скелета. Юлиус Вольф и его работа «Закон трансформации кости»

А.С. Аврунин ✉ a\_avrunin@mail.ru  
Е.А. Цесь ✉ tses.elena@mail.ru

Российский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена  
Минздрава РФ  
ул. Академика Байкова, д. 8, Санкт-Петербург, Россия, 195427

Представлена краткая биография Ю. Вольфа. Показано, что в основе открытого им закона лежат метод графической статики Карла Кульмана и данные анатома Г.Х. фон Мейер о внутренней структуре проксимального участка бедренной кости. Именно это сотрудничество анатома и инженера привело к возникновению нового научного направления – биомеханика скелета. Рассмотрены ошибки биологических представлений Ю. Вольфа, в первую очередь утверждения, что трабекулы всегда пересекаются перпендикулярно друг другу. По сути Ю. Вольф ограничил свои представления идеальной ситуацией, в которой механическая среда характеризуется единственной или преобладающей нагрузкой. Представлена критика суждений Ю. Вольфа современными генетиками, которая вызвана популяризацией обратной гипотезы, что форму кости можно использовать для реконструкции действий, которые «произвели» эту форму согласно «математическим законам». В работе подчеркнута, что заслугой Ю. Вольфа является создание теоретической концепции, которая до настоящего времени лежит в основе разработки не только теоретических, но и практических адаптационных аспектов биомеханики скелета. Отмечено также, что эта концепция представляет по сути модель, которая имеет все присущие моделированию биологических объектов достоинства и недостатки. Представлен перевод на русский язык первых фрагментов монографии Ю. Вольфа «Das Gesetz der Transformation der Knochen» (Berlin, 1892). Введение в русскоязычный оборот первоисточника позволит специалистам, интересующимся проблемами биомеханики, составить более полное представление о влиянии закона Ю. Вольфа на развитие современной биомеханики скелета и о его значении для развития ортопедии и травматологии.

**Ключевые слова:** Юлиус Вольф, биомеханика скелета, механические свойства кости, закон Вольфа, силовые линии, губчатая кость

## The birth of a new scientific field — biomechanics of the skeleton. Julius Wolff and his work “Das Gesetz der Transformation der Knochen”

Alexander S. Avrunin ✉ a\_avrunin@mail.ru  
Elena A. Tses ✉ tses.elena@mail.ru

Russian Scientific Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after R.R. Vreden  
8 Ak. Baykova St., Saint Petersburg 195427, Russia

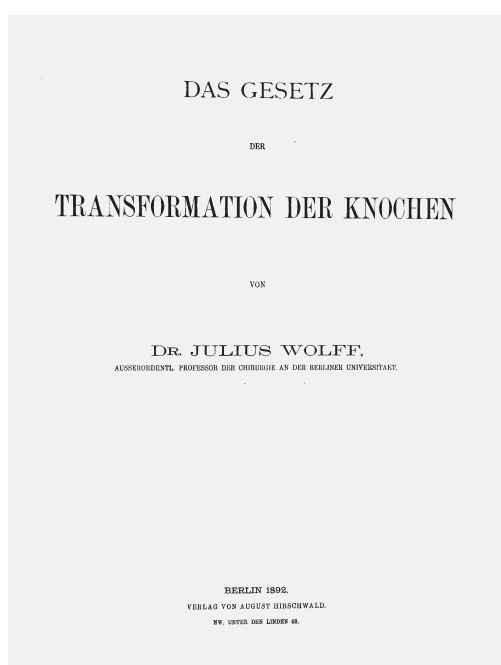
A brief biography of Julius Wolff is presented. It is demonstrated that the basis for the law he discovered is the graphic statics method of Carl Culmann and anatomist G.H. von Meyer's data on the internal structure of the proximal femur. It was namely this cooperation between anatomist and engineer that led to the emergence of a new scientific field – the biomechanics of the skeleton. Wolff's errors in biological concepts are reviewed – first of all, the claim that trabeculae always intersect perpendicular to each other. In fact, Wolff limited his concept of the ideal situation in which the mechanical environment is characterized by a sole or predominant load. Also presented is contemporary geneticists' criticism of Wolff's assertions, which arose due to the popularization of the reverse hypothesis – that the shape of the bone can be used to reconstruct actions that “produced” this form according to “mathematical laws”. The paper stresses that Wolff's merit lies in his creation of a theoretical concept, which to date is the basis of the development of not only theoretical but also practical adaptation aspects of biomechanics of the skeleton. It is also noted that this concept is, in fact, a model that has all the advantages and disadvantages inherent in the modeling of biological objects. The Russian translation of the first fragment of Wolff's monograph “Das Gesetz der Transformation der Knochen” (Berlin, 1892) is presented. The introduction into the Russian language of a first-hand source will allow specialists interested in the problems of biomechanics to receive a complete picture of the impact of Wolff's law on the development of modern biomechanics of the skeleton and its significance for the development of orthopedics and traumatology.

**Keywords:** Julius Wolff, biomechanics of the skeleton, bone mechanical properties, Wolff's law, lines of force, spongy bone

Как российские, так и зарубежные авторы в публикациях, посвященных адаптации костей к механическим нагрузкам, часто ссылаются на закон J. Wolff, который они называют «закон ремоделирования кости» [1–9]. Классический пример – перевод книги Юлиуса Вольфа (Julius Wolff) на английский язык, сделанный в 1986 г. P. Maquet и R. Furlong и названный ими “The law of bone remodeling” [10]. Однако Ю. Вольф назвал свою монографию “Das Gesetz der Transformation der Knochen” [11] (рисунок), используя термин «*трансформация*», который, по его мнению, наиболее точно отражает суть рассматриваемой проблемы. Если же использовать современную терминологию, то, как отмечают Т.Н. Smit и Е.Н. Burger [12], адаптация по закону Ю. Вольфа скорее является законом моделирования, а не ремоделирования, так как рост, дрейф поверхности и функциональная адаптация костей – это разные формы моделирования. Ремоделирование же представляет собой локальную резорбцию и последующее формирование в зоне этой резорбции костной ткани, что обеспечивает замещение старых костных структур новыми, происходящее без изменения геометрических параметров кости.

Другими словами, чем дальше от нас конкретное научное событие, тем больше степень его «осовременивания» за счет использования терминов, смысловое содержание которых существенно искажает первоначальный смысл описываемого научного явления. В этом отношении закон Ю. Вольфа не является исключением. В контексте рассматриваемой проблемы дополнительные трудности возникают в связи с тем, что не всем специалистам доступен первоисточник, так как немногие библиотеки имеют в своих фондах манускрипты Ю. Вольфа. Кроме того, его тексты написаны на немецком языке XIX в., что создает дополнительные сложности при их прочтении и переводе. Таким образом, практически для большинства отечественных ортопедов, травматологов, остеологов и других специалистов работы Ю. Вольфа недоступны.

Цель данной работы – кратко описать исторические условия, в которых Ю. Вольфом был открыт закон трансформации кости,



Титульный лист работы Ю. Вольфа “Das Gesetz der Transformation der Knochen” (Берлин, 1892).

и представить перевод с немецкого первых фрагментов его монографии “Das Gesetz der Transformation der Knochen” (Берлин, 1892).

#### Краткая биографическая справка (по данным R.A. Brand [13])

Юлиус Вольф (1836–1902) родился в марте 1836 г. в Меркши-Фридланде в Западной Пруссии (ныне – Мирославец, Польша). После окончания гимназии он поступил в Берлинский университет. Ю. Вольф изучал медицину во Фридрих Вильгельм Университете (в настоящее время Берлинский университет имени Гумбольдта), где в 1860 г. под руководством Бернхарда Лангенбека (Bernhard Langenbeck) – основателя журнала «Архив клинической хирургии Лангенбека» – защитил диссертацию (“De Artificiali Ossium Productione в Animalibus”). В 1869 г. Ю. Вольф женился на А. Вайгерте (A. Weigert), имел трех детей, один из которых погиб в возрасте 6 лет. В Еврейском музее Франкфурта хранятся 168 частных писем Ю. Вольфа, в которых есть свидетельства о том, что он был предан своей семье, любил классическую музыку и литературу, писал стихи для племянников. По воспоминаниям жены, Ю. Вольф каждое утро вставал в 5:00 и не менее трех часов посвящал

исследованиям. В 1864 г. Ю. Вольф участвовал в прусской кампании против Дании, в 1866 г. — против Австрии и в 1870—1871 гг. — против Франции, был награжден Железным крестом. С 1868 г. он читал лекции в университете, стал приват-доцентом, начал частную практику, а затем открыл собственный институт — Частный институт ортопедических болезней (Privatinstitut orthopadische Erkrankungen). В 1884 г. Ю. Вольф был назначен внештатным профессором университета. В это время ортопедия как дисциплина начинала отделяться от хирургии, и в 1889 г. Вильгельм Валдеиер-Харц (Wilhelm Waldeyer-Hartz, 1836—1921), декан Шарите (Charité)<sup>1</sup>, подал в правительство прошение о включении Института Вольфа в состав университета. Другие преподаватели этой университетской клиники, включая патолога Р. Вирхова (R. Virchow), хирурга Э. фон Бергмана (E. von Bergmann), терапевта Э. фон Лейдена (E. von Leyden) и педиатра Е. Эноха (E. Enoch), которые были заинтересованы в результатах исследований Ю. Вольфа, поддержали это прошение. В 1890 г. Институт Вольфа вошел в состав Берлинского университета имени Гумбольдта (Friedrich Wilhelm Universität) как частнопрактикующая клиника, и ее директором стал Ю. Вольф. В 1894 г. его институт стал Поликлиникой ортопедической хирургии. В 1899 г. за выдающийся вклад в развитие медицины Ю. Вольф был назначен Тайным медицинским советником<sup>2</sup>. В 1902 г. поликлиника с тридцатью койками была полностью интегрирована в Шарите. Это произошло в 1902 г., за несколько месяцев до смерти Ю. Вольфа от нарушения мозгового кровообращения.

#### **Об исторических условиях второй половины XIX века и возникновении нового научного направления — биомеханики скелета**

Любое научное открытие основывается на результатах исследований, проведенных ранее другими учеными. Можно говорить о том, что одним из важнейших условий, по-

зволивших Ю. Вольфу сформулировать «закон трансформации», стали разработки немецкого инженера Карла Кульмана (Carl Culmann, 1821—1881) метода графической статики, применение его в механике и публикация первой монографии по этой проблеме. Автор на примере призматической балки, закрепленной одним концом и с нагруженным другим (свободным), впервые показал распределение напряжений, которые в современной литературе названы траекториями главных напряжений [14, 15].

В 1867 г. швейцарский анатом Г.Х. фон Мейер опубликовал рисунки внутренней структуры проксимального участка бедренной кости, что заложило основу его сотрудничества с К. Кульманом. Впервые инженер и анатом совместно проводили серьезные исследования влияния механической окружающей среды на трабекулярные структуры [16]. Этому сотрудничеству предшествовал диалог между инженером К. Кульманом и анатомом Г.Х. фон Мейером. Когда последний демонстрировал внутреннюю архитектуру бедренной кости, К. Кульман воскликнул: «Это — мой подъемный кран» [17]. На результаты их сотрудничества обратил внимание W. Roux, впервые использовавший термин «функциональная адаптация». Однако концепцию функциональной адаптации, несмотря на то что ее первым предложил W. Roux, в последующем стали связывать с именем профессора хирургии Ю. Вольфа [18].

#### **О роли Ю. Вольфа в становлении и развитии биомеханики**

В контексте рассматриваемой проблемы важно, что именно К. Кульман и Г.Х. фон Мейер впервые показали взаимосвязь вариантов внутренних механических напряжений с ориентацией трабекул. Ю. Вольф поддержал эту концепцию только через два года, и его главная заслуга, по мнению С.Р. Jacobs [16], заключается в том, что он обеспечил популяризацию этой идеи и признание ее широкой медицинской общественностью. Ю. Вольф посвятил большую часть своих публикаций концепции ориентации трабекул, названной им «теорией траекторий». В то же время он увлеченно читал лекции, во время которых использовал многочисленные при-

<sup>1</sup> Клинический корпус университетской клиники в Берлине, крупнейший госпиталь Европы.

<sup>2</sup> Почетное звание врача, состоящего на государственной службе.

меры, иллюстрирующие переориентацию направления трабекул после изменения внутренних образцов напряжений, возникающих в том числе и при заживлении перелома с неправильным положением отломков. Гипотеза Ю. Вольфа стала бесспорной для научного сообщества того времени. Часто ему приписывают открытие адаптации губчатой кости и говорят о его существенном вкладе в популяризацию научной дисциплины, возникшей на стыке биологии и механики [16], направления, названного биомеханикой и имеющего в наши дни не только научное, но и клиническое значение.

Ю. Вольф в своей «теории траекторий» утверждает, что трабекулы всегда пересекаются перпендикулярно друг другу. Это заключение автор обосновал, используя установленный в механике факт, согласно которому внутренние напряжения всегда пересекаются перпендикулярно для любого случая нагрузки. Так как трабекулы ориентируются в направлении этих напряжений, следовательно, архитектура губчатой кости формирует сеть перпендикулярных пересечений. На основе этой логики Ю. Вольф критиковал анатомические рисунки Г.Х. фон Мейера, основанные на результатах исследования посмертных образцов и поэтому не показывающие архитектуру перпендикулярных пересечений.

По сути Ю. Вольф ограничил свои представления идеальной ситуацией, в которой механическая среда характеризуется единственной или преобладающей нагрузкой. Он полагал, что адаптация губчатой кости находится вне пределов его качественных наблюдений и существует в терминах «закона, согласно которому наблюдаемые изменения внутренней архитектуры следуют математическим правилам...» [16]. И хотя с современной точки зрения повседневная нагрузка скелета создает механическую среду, которая не всегда может эффективно поддерживаться перпендикулярной структурой трабекулярных пересечений, заслугой Ю. Вольфа является инициация существующего до настоящего времени научного интереса к адаптационным аспектам биомеханики губчатой кости.

В публикациях, рассматривающих закон Ю. Вольфа в отношении процессов адаптив-

ной перестройки костей, редко отмечается, что формулировка этого закона, касающаяся их формы и функции, основана на статической математической связи между трабекулярной архитектурой и траекториями напряжений. При этом Ю. Вольф избегал любого исследования механизмов адаптивного поведения в индивидуальных пределах, полагая, что «форма» кости наследуется. Основные принципы закона Ю. Вольфа и его неправильных представлений относительно биологии скелета возникли не только из-за ограниченности доступных в конце XIX в. автору методов, но и из-за его отказа принять уже известные на тот момент факты. Например, в понимании Ю. Вольфа «функция» подразумевала статические нагрузки костных структур. Это существенно отличало его взгляды от представлений W. Roux, выраженных в тезисе о динамическом взаимодействии. Он также полагал, что увеличение кости происходит исключительно интерстициальным ростом. Ю. Вольф отклонял понятие резорбции, хотя этот механизм уже был описан A. Monro (1776 г.) и J. Howship (1816 г.). Тем не менее, несмотря на некорректное толкование, закон Ю. Вольфа стал общепринятой теорией. M.R. Forwood и C.H. Turner [19] подчеркивают: «...Факт, что Ю. Вольф был неправ относительно всех биологических аспектов “его” закона, кажется, мало кого беспокоит. Ссылки на W. Roux можно найти только в исторических фондах хороших библиотек» [19]. Дополнительные сведения, касающиеся вопросов исторических условий второй половины XIX в., определивших возникновение биомеханики скелета как отдельной научно-клинической дисциплины, также содержатся в работе С.В. Архипова-Балтийского [20].

В контексте изложенного важно, что если в конце XIX в. Ю. Вольф предполагал, что «форма» кости наследуется, то через 100 лет, в начале XXI в., закон Ю. Вольфа подвергли жесткой критике С.О. Lovejoy и соавт. [21] именно с генетических позиций. Эти авторы посвятили данной проблеме целый раздел своей работы. Так как он имеет существенное значение для понимания рассматриваемой нами проблемы, кратко обозначим его основные моменты.

### Закон Вольфа: новое толкование роли деформаций для морфогенеза кости

Как подчеркивают С.О. Lovejoy и соавт. [21], в XX веке доминировало универсальное предположение о том, что структура кости формируется по закону Ю. Вольфа. Согласно этому закону кость путем активации неизвестных механизмов способна преобразовать режимы нагрузки в четкие изменения внутренней архитектуры с аналогичными вторичными изменениями во внешней структуре в соответствии с математическими законами. Такие представления привели к популяризации обратной гипотезы, что форму кости можно использовать для реконструкции действий, которые «продуцировали» эту форму при условии, что «математические законы» известны, а адаптацию и действия можно вывести из геометрических исследований структуры кости. При этом игнорируются анаболические аспекты экспрессии генов, которые относят к плохо изученным. В этой связи авторы утверждают, что именно о генетике скелета теперь известно больше, чем о «математических законах», соответственно которым кости гипотетически моделируют себя. Авторы подчеркивают, что хотя и существуют многочисленные данные о поведении кости под механической нагрузкой, до настоящего времени неясны законы, соответственно которым достигается требуемый результат формирования кости путем использования неизвестного набора математически подобных функций трансдукции, несмотря на давние попытки определить такие законы [21].

Подобный генетический акцент при рассмотрении адаптивных процессов формирования архитектуры скелета нельзя рассматри-

вать как излишне тенденциозный. Однако необходимо учитывать и тот факт, что форма кости всегда меняется при изменении характера ее функциональной активности. Это сцепление механобиологических факторов возникает с момента раннего развития, когда клеточная структура зародыша начинает испытывать деформации и давление, которые продолжают воздействовать в дальнейшем в течение роста, развития и старения организма. Понимание влияния биофизических стимулов на рост скелета и адаптацию представляет большой интерес в биологии и медицине различных патологических и физиологических состояний.

По сути концепция и закон, сформулированные Ю. Вольфом, являются только одной из существующих моделей, отражающих ряд характеристик биомеханики скелета. Как любая модель, она представляет собой упрощенную копию природных событий со всеми присущими моделированию естественных процессов достоинствами и недостатками. В этой связи важно, что данная концептуальная модель до настоящего времени используется в ортопедо-травматологической практике для прогноза развития репаративно-регенеративных процессов. Более детальное рассмотрение достоинств и недостатков модели Ю. Вольфа требует специального исследования.

Предлагаем перевод на русский язык первой части фундаментального исследования Ю. Вольфа “Das Gesetz der Transformation der Knochen”. Отечественные специалисты смогут не только познакомиться с содержанием этой работы, но и составить более точное представление о ее значимости для современной клинической медицины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Bertram J.E.A., Swartz S.M.* The “law of bone transformation”: a case of crying Wolff? Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society. 1991; 66(3): 245–273.
2. *Bono E.S., Smolinski P., Casagrande A., Xu J.* Three-dimensional trabecular alignment model. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. 2003; 6(2):125–131.
3. *Chamay A., Tschantz P.* Mechanical influences in bone remodeling. Experimental research on Wolff’s law. Journal of biomechanics. 1972; 5: 173–180.
4. *Chang G., Regatte R.R., Schweitzer M.E.* Olympic fencers: adaptations in cortical and trabecular bone determined by quantitative computed tomography. Osteoporosis Int. 2009; 20(5): 779–785. doi: 10.1007/s00198-008-0730-z.

5. Duncan R.L., Turner C.H. Mechanotransduction and the functional response of bone to mechanical strain. *Calcified tissue international*. 1995; 57(5): 344–358.
6. Duyck J., Naert I.E., van Oosterwyck H., van der Sloten J., de Cooman M., Lievens S., Puers B. Biomechanics of oral implants: a review of the literature. *Technology and Health Care*. 1997; 5(4): 253–273.
7. Keaveny T.M., Morgan E.R., Niebur G.L., Yeh O.C. Biomechanics of trabecular bone. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2001. 3: 307–333.
8. Kelly P.J., Montgomery R.J., Bronki J.T. Reaction of the circulatory system to injury and regeneration. *Clinical orthopaedics and related research*. 1990; (254): 275–288.
9. Shea K.G., Ford T., Bloebaum R.D., D'Astous J., King H. A comparison of the microarchitectural bone adaptations of the concave and convex thoracic spinal facets in idiopathic scoliosis. *The Journal of bone and joint surgery*. American volume. 2004; 86(5): 1000–1006.
10. Wolff J. The law of bone remodeling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1986. 126 p.
11. Wolff J. Das Gesetz der Transformation der Knochen. A Hirschwald, Berlin, 1892. 162 s. [in German]
12. Smit T.H., Burger E.H. Is BMU-coupling a strein-regulated phenomenon? A finite element analysis. *Journal of Bone and Mineral Research*. 2000; 15(2): 301–307.
13. Brand R.A. Biographical Sketch Julius Wolff, 1836–1902. *Clinical orthopaedics and related research*. 2010; 468(4): 1047–1049. DOI 10.1007/s11999-010-1258-z.
14. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов. Пер. с англ. М.: Гостехиздат. 1957. 327 с. // Timoshenko S.P. *Istoriya nauki o soprotivlenii materialov (Science history about resistance of materials)*. Moscow: Gostekhizdat, 1957. 327 p. [in Russian]
15. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. М.: Мир, 1976. 253 с. // Timoshenko S.P., Gere D. *Mekhanika materialov (Mechanics of materials)*. Moscow: Mir, 1957. 253 p. [in Russian]
16. Jacobs C.R. The mechanobiology of cancellous bone structural adaptation. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 2000; 37(2): 209–216.
17. van der Meulen M.C.H., Prendergast P.J. Mechanics in skeletal development, adaptation and disease. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2000; 358: 565–578.
18. Skerry T.M. One mechanostat or many? Modifications of the site-specific response of bone to mechanical loading by nature and nurture. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. 2006; 6(2): 122–127.
19. Forwood M.R., Turner C.H. Skeletal adaptations to mechanical usage: results from tibial loading studies in rats. *Bone*. 1995; 17(4 Suppl): 197S–205S.
20. Архипов-Балтийский С.В. Рассуждение о морфомеханике. Норма. В 2 т. Калининград, 2004. 820 с. // Arkhipov-Baltiyskiy S.V. *Rassuzhdeniye o morfomekhanike. Norma (Discourse on morfomekhanike. Norm)*. In 2 vols. Kaliningrad, 2004. 820 p. [in Russian]
21. Lovejoy C.O., McCollum M.A., Reno P.L., Rosenman B.A. Developmental biology and human evolution. *Annu Rev Anthropol*. 2003; 32:85–109. doi: 10.1073/pnas.1403659111.

Получено / Received: 26.09.16

### Информация об авторах

Аврунин Александр Самуэлевич – доктор медицинских наук, старший научный сотрудник отделения диагностики заболеваний и повреждений опорно-двигательной системы Российского научно-исследовательского института травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена (Санкт-Петербург).

Цесь Елена Анатольевна – лаборант отделения диагностики заболеваний и повреждений опорно-двигательной системы Российского научно-исследовательского института травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена (Санкт-Петербург).

### About the authors

Alexander Samuelevich Avrunin – Doctor of Medical Sciences, Senior researcher at the Diagnostic department for diseases and injuries of the musculoskeletal system, Russian Scientific Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after R.R. Vreden (Saint Petersburg).

Elena Anatolevna Tses – Laboratory assistant at the Diagnostic department for diseases and injuries of the musculoskeletal system, Russian Scientific Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after R.R. Vreden (Saint Petersburg).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**Закон трансформации кости доктора Юлиуса Вольфа, сверхштатного профессора  
клиники Берлинского Университета<sup>3</sup>**

**Вступление**

Цель данного труда – наиболее исчерпывающе обосновать математически, анатомически и клинически установленный мною «закон трансформации кости» и построенные на его основе теории «функциональной формы кости» и «трансформации силы». Наряду с этим в работе подробно рассмотрены выводы, проистекающие из «закона трансформации кости» и представляющие интерес для остеологии и других областей медицины, а также некоторые общетеоретические вопросы, касающиеся природных явлений.

В начале моего изложения, выполняя долг, выражаю глубокую признательность за содействие Королевской Прусской Академии наук, на заседании которой 22 октября 1891 г. было принято решение об издании настоящей работы, что явилось для меня проявлением высочайшей чести.

Также я благодарен многочисленным ученым: господам – профессору Ackermann (Halle), von Bergmann (Berlin), Billroth (Wien), Н. Fischer (Breslau), прозектору, доктору Frankel (Hamburg), профессору Hasse (Breslau), Koenig (Göttingen), Koester (Bonn), von Linhart (Würzburg), Lucae (Frankfurt), Mihal-kowitsch (Budapest), Bindfleisch (Würzburg), Roux (Innsbruck), доктору Theodor Simon (Hamburg), профессору R. Virchow (Berlin), Richard von Volkmann (Halle), Weigert (Frankfurt) и Zenker (Erlangen) за радушное представление в мое распоряжение коллекции дорогостоящих препаратов для изучения закона трансформации.

**Первая часть. Представление Закона трансформации кости**

С 1870 по 1872 г. я искал доказательства того, что все патологические изменения внутренней архитектуры кости предопределены патологией внешней формы. Это происходит по внешним или внутренним причинам и под статической нагрузкой кости. При этом в аналогичных случаях форма преобразования всякий раз повторяется.

Одновременно я стремился показать, что эти преобразования находятся в прямой связи с восстановлением функции патологически измененной кости. В связи с этим становится понятным использование графической статистики, демонстрирующее распределение сил в нагруженной балке по непреложным правилам математики, а следовательно, и патологических изменений внутренней архитектуры кости, которая в целом тем не менее вновь функционирует как нормально сформированная.

В дальнейшем, в 1872 г., я подтвердил, что упомянутые патологические преобразования внутренней архитектуры костей при одновременной их нагрузке также происходят по математическим правилам. Они по-прежнему вторичны, а изменения внешней формы кости всегда повторяются аналогичным образом. Следовательно, одно из первичных нарушений формы предшествует вторичным формоизменениям, математически обоснованным и вызывающим соответствующие проявления во внешнем виде этих костей, названным позже von Roux «функциональными».

В 1884 г. я присовокупил доказательства того, что нагрузка также инициирует подобные патологические нарушения путем аналогичных хорошо обоснованных математически преобразований, которые самостоятельно, то есть без синхронного первичного формоизменения, приводят к изменениям как внутренней архитектуры, так и внешнего вида.

<sup>3</sup> Перевод с немецкого книги Ю. Вольфа «Das Gesetz der Transformation der Knochen» (Berlin, 1892) осуществлен А.С. Авруниным и Е.А. Цесь. Рисунки приводятся по изданию Ю. Вольфа с сохранением исходной нумерации. Далее все комментарии Ю. Вольфа. – *Примеч. ред.*

Наконец, в 1884 и 1885 г. я также показал, что к обсуждаемым преобразованиям формы и впоследствии архитектуры кости приводят не патологические условия, а изменение ее статической нагрузки. Таким образом, можно формировать не только аномалию костной формы, умышленно нарушая статическую нагрузку кости, но и при внешней деформации кости возвращаться к норме, за счет создания нормальной статической нагрузки.

В первой работе о костной трансформации я преимущественно только предположил возможность «преобразования внутренней архитектуры при внешней патологии костной формы». Позднее, соответственно этому, я обозначил закон архитектурных превращений как «закон трансформации кости»<sup>4</sup>.

По сравнению с первоначальными, мои поздние исследования привели меня к пониманию «закона трансформации» в более широком смысле.

Кроме того, что при *первичных* нарушениях формы возникают вынужденные архитектурные преобразования, при *первичных* нарушениях формы происходят и *вторичные* преобразования формы.

Таким образом, к понятию «закона трансформации» относятся также те преобразования формы и архитектуры, которые происходят при изменении статической нагрузки кости самостоятельно, то есть без одновременного первоначального нарушения формы. Наконец, нужно учитывать также те преобразования формы и архитектуры, которые служат экспериментальным и терапевтическим целям и вызываются искусственно, посредством видоизменений статической нагрузки кости. Следовательно, под «законом трансформации кости» подразумевается закон, определяющий первичные видоизменения формы кости и нагрузки на нее или только нагрузки, которые предписывают преобразования внутренней архитектуры костей. Эти преобразования осуществляются по правилам математики, и по этим же пра-

<sup>4</sup> Vgl. J. Wolff. Das Gesetz der Transformation der inneren Architectur der Knochen bei pathologischen Veränderungen der äusseren Knochenform. Sitzungsberichte der Königl. Preuss. Akademie der Wissenschaften. 1884. XXII. Sitzung der physicalisch-mathematischen Classe von 24. April 1884. Vorgelegt von Herrn du Bois-Reymond am 13. März 1884.

вилам инициируют последующие вторичные изменения внешней формы соответствующих костей.

#### **Вторая часть. Нормальная внутренняя архитектура кости и ее математическое значение**

Понимание «закона трансформации кости» возможно только на основе точных знаний стандарта отношений внутренней архитектуры костей, в особенности на математических значениях этой архитектуры, сведениях, обнаруженных математиком Кульманом, жителем Цюриха. Поэтому подробному рассмотрению здесь, прежде всего, подлежит вопрос соответствующих взаимоотношений в костной архитектуре, т.е. нормы.

В данной части после предыстории открытия внутренней архитектуры кости я сначала подробно опишу архитектуру вертлужного конца бедренной кости как самого подходящего участка человеческого тела. Затем я объясню значение траекторий напряжения графической статикой. После этого, используя схожесть бедра человека с «краном», привлекая кульмановские расчеты, разъясню математическое значение внутренней архитектуры кости.

#### **Первая глава. Историческое предисловие**

Появившийся к началу нашего века анатомический атлас Loder<sup>5</sup> содержал иллюстрации внутренней архитектуры многих костей: бедренной, большеберцовой, плечевой и различных позвонков. Между тем внешне рисунки были крайне скудны. Также автор мало знал о значении типичного местоположения опорных балок губчатого слоя кости и поэтому описывал их размещение очень кратко и неточно. Например, относительно бедренной кости он ограничился следующим замечанием: «И наверху и внизу кость обрамляет присутствующая ретикулярная субстанция, здесь и отсюда сохраняются либо нити, либо пластинки»<sup>6</sup>.

Архитектурой губчатого слоя и ее связью с механической работой костей подробно занялись только в начале тридцатых годов нашего столетия.

<sup>5</sup> Loder Tabulae anatomicae. Vimariae 1805. T. III. Tab. XV.

<sup>6</sup> T. I p. 46; T. III. Tab. XV. Fig. 7.



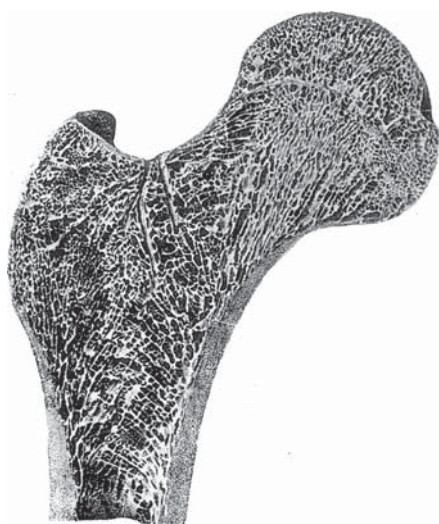


Рис. 1. Иллюстрация Jacob внутренней архитектуры фронтального продольного разреза центра вертлужного конца бедра в «Анатомическом труде» Bourguery и Jacob (1832).

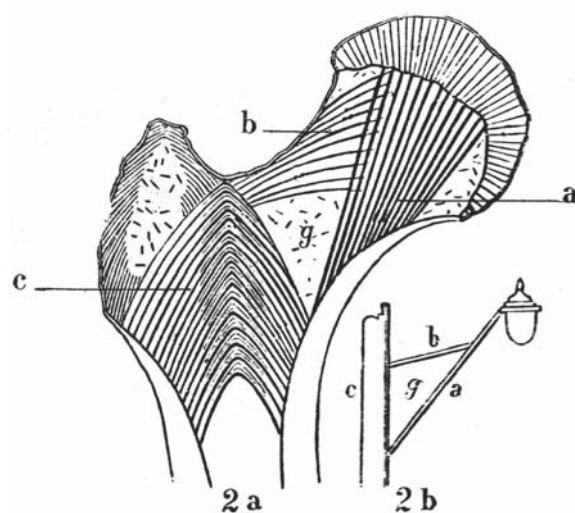


Рис. 2. Схематичное изображение Ward той же архитектуры (1838 г.; 2a) и изображение Ward схемы «крана» старым способом (2b).

В большом труде по анатомии von Bourguery<sup>7</sup>, изданном в 1832 г., мы нашли превосходно оформленные рисунки von Jacob, также изображавшие кости и их внутреннюю архитектуру. Возвращаясь к Bourguery и к иллюстрациям Jacob внутренней архитектуры вертлужного конца бедренной кости<sup>8</sup> (рис. 1), мне интересно с исторической точки зрения доказать, что сведения об архитектуре губчатого слоя были условные и не имелось новых данных, как это принято, в большей части публикаций последней четверти прошлого века.

Относительно иллюстраций особо похвально, что Bourguery, повсюду описывая их, прежде всего подчеркивает связь архитектуры с механической функцией костей. Например, в изображении верхнего конца бедренной кости он обращает внимание на положение «кривой давления», где балки губчатого слоя особенно плотны и тверды, в то время как вне кривой давления находятся более тонкие балки разветвленной сети<sup>9</sup>. Описывая изображение упомянутой «кривой давления» в

бедренной кости, в частности ее положение, Bourguery был неоднократно неточен и неверен.

Возникшая в 1838 г. остеология<sup>10</sup> воспроизводит схематичный рисунок (рис. 2a и 2b) одного-единственного участка внутренней архитектуры кости — вертлужного конца бедренной, вместе с кратким описанием этой архитектуры. Этот английский автор, до некоторой степени правильно, пытается показать, представляя по аналогии, сходство «подъемного крана» с верхним концом бедренной кости человека, а также условий напряжения кости — сжатия и растяжения. Рисунок бедренной кости (см. рис. 2a) на схеме объединен с изображением «подъемного крана» (рис. 2b).

На изображении бедренной кости он выделяет три группы костных балок: первая — «механизм арки» («arch-work», c), аналог столба держащего «подъемный кран», затем — группа поднимающихся костных балок, идущая от одной из главных частей медиальной стороны кортикального слоя головки к ее центральной части, напоминающая центральную балку «подъемного крана» — «принцип поддержки» («principal sup-

<sup>7</sup> Traite complet de l'anatomie de l'homme par Bourguery. Avec planches lithographiees d'apres nature par Jacob. Paris 1832.

<sup>8</sup> l. c. T. I. Pl. 43. Fig. 1.

<sup>9</sup> e. l. T. I. p. 118.

<sup>10</sup> F.O. Ward Outlines of human Osteology. London 1838. p. 370.

port», *a*); и, наконец, — группа (*b*), идущая от вершины «механизма арки» к нижней части головки — устройство поперечной части («cross piece») — аналог центральной балки столба, подпирающего перекладину. Между тремя группами находится пространство, снабженное трехгранной костной балкой с очень тонкой поверхностью, соответствующее расположению треугольника «подъемного крана» (*q*). Группа *a* обеспечивает через свою жесткость («неподатливость») оказание сопротивления давлению груза корпусом, в то время как группа *b*, через свою вязкость («тягучесть»), противостоит нагрузке движения. Представление сути бедренной кости на основе принципа «подъемного крана» как суммы свойств головки и шейки бедренной кости ошибочно, и как позже учил Кульман, качество бедренной кости надо рассматривать только в совокупности свойств головки, шейки и диафиза бедренной кости, и это в большей степени соответствует представлениям современных инженеров.

Соответственно старому способу изображения «механизма подъемного крана» в начале 50-х годов нашего столетия (рис. 9), конструкторы совершенствуют бедренную кость человека, укрепляя ее твердой перегородкой или столбом, используя право корректного механизма «подъемного крана».

У меня есть рисунок 1849 г. (представлен в 1857 г.) Jefferies Wyman<sup>11</sup> — американского анатома (рис. 3), являющийся схематичной иллюстрацией архитектуры вертлужного конца бедренной кости.

Wyman описал архитектуру губчатого слоя позвонка, верхнего конца бедренной<sup>12</sup>, таранной и пяточной костей точнее, чем его упомянутые выше предшественники. Он опровергает наличие в верхнем конце бедренной кости «механизма дуги» (*c*; см.

<sup>11</sup> J. Wyman, как и профессор Е.Н. Bradford, лечил в Бостоне (род. в 1814 г. ум. в 1874 г.). С 1847 он был профессором анатомии и председателем Бостонского общества исследователей природы.

<sup>12</sup> Jefferies Wyman. On the cancellated structure of the bones of the human body. Boston Journal of natural history. Vol. VI 857, p. 125–140. (Communicated 7. Nov. 1849). Отмечу, что в литературе осталась почти неизвестной исторически важная работа Wyman, о которой упоминает господин Dr. Max Bartels.

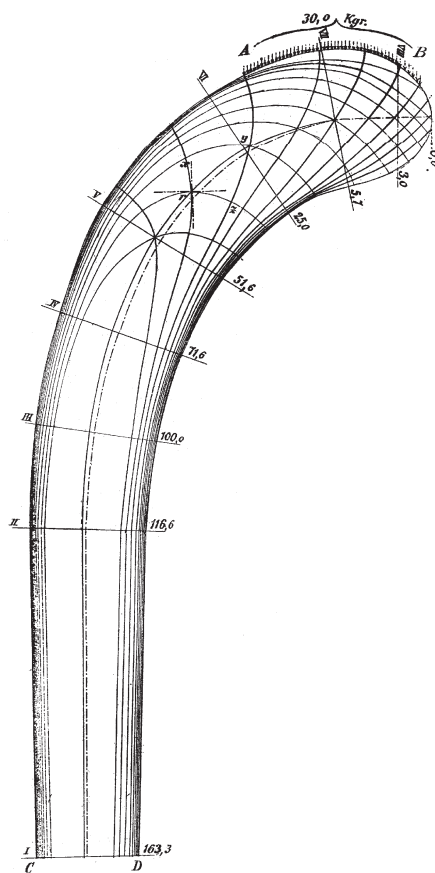


Рис. 9. Линии давления и движения Culmann безупречны для аналогии с «краном», обладающим очертаниями верхней части бедренной кости человека, и находятся под нагрузкой до 25 кг в должном месте вертлужной впадины.

Кроме предложенной большой нагрузки, на 8 разных уровнях высоты «крана» проходят поперечные сечения.

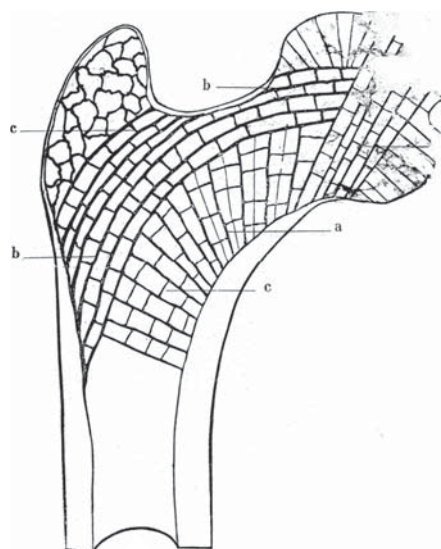


Рис. 3. Схематичное изображение Wyman архитектуры фронтального продольного разреза вертлужного окончания бедренной кости (1849).



Рис. 6а. Фотоизображение той же архитектуры на фанероподобной пластине (1870).

Срез бедренной кости юноши (15 лет) проходит через кость, примерно на границе передней и средней его трети, и касается передней поверхности костномозговой полости перегородки диафиза нижней части.

рис. 2а и 2б) и «треугольника» (g; см. рис. 2а и 2б)<sup>13</sup>. Вместо этих трех групп балок он обозначает другие три системы балок – синус с медиальной стороны (а) и с латеральной стороны (b) восходящей системы и третью систему небольших поперечных балок (с), соединяющую первые системы друг с другом посредством двух смежных балок.

Рассматривая обе первые системы, он вполне верно считал, что они выступают в качестве систем сжатия и растяжения, третья же система, напротив, полностью ошибочна.

<sup>13</sup> Как показывает наше последующее описание (раздел 2 глава I), Вуман был несправедлив по отношению к треугольнику q Ward. Наш рисунок 6b также демонстрирует ошибочность толкований в наблюдении надежно опирающейся аркады Ward. Здесь около аркады Ward есть место, заполненное особенно густой сетью балок. (Перевод указанного фрагмента не вошел в данную публикацию. – Примеч. ред.)

Описанные им тонкие поперечные балки, формирующие третью систему, на самом деле ведут себя иначе, чем отмечал и толковал автор. Вуман увидел, что существующие смежные балки первых систем соединяются не только друг с другом, но и почти везде, соответственно, формируют непрерывную кривую, принадлежащую либо системе а, либо системе b. Упомянутые недостатки восприятия и описания Вуман легко выявляются при сопоставлении рисунка (рис. 3) Вуман с нашим фотолитографическим изображением (рис. 6а).

Впрочем, достоинством наблюдений Вуман является ценное частное замечание о том, что тонкие поперечные балки третьей группы находятся вертикально к балкам первых групп. Вуман не использовал результаты накопленного опыта. Между тем особое значение имеет пересечение под прямым углом не только одной поперечной балки, но и перекрестного направления всех балок трех описанных групп, и здесь действует важный всеобъемлющий закон.

В немецкой литературе с начала 1851 г., пражанин (ранее житель Цюриха), профессор анатомии J. Engel<sup>14</sup> описывает и изображает архитектуру губчатого слоя. Он пишет: «В период образования скелета лучевые кости с удивительной правильностью и однородностью соединяются друг с другом, благодаря чему вскоре после формирования вершин у костей появляется изысканный вид, а также традиционная длина и поперечное сечение взрослой кости, костный мозг и кора, подводящие к желаемой утонченности и полному архитектурному порядку»<sup>15</sup>. «И не без надобности, – пишет он далее<sup>16</sup>, – разные кости имеют разную архитектуру и применение: то стрельчатая арка, то эллиптическая дуга, окружность; используются то вертикальный контрфорс, то наклонная опора, имеющие разное назначение, помимо того, чтобы своим изящным видом радовать глаз анатома».

Разумеется, отвечая немногим ожиданиям, подобрав весьма точные слова, Engel в

<sup>14</sup> Engel Ueber die Gesetze der Knochenentwicklung. Sitzungsberichte der Wiener Academie der Wissenschaften. VII. Bd. 1851. S. 591 ff. Taf. 25 – 28.

<sup>15</sup> e. 1. S. 591.

<sup>16</sup> 1. c. S. 683.

приведенных рассуждениях достиг наиболее правильного понимания содержания обширного труда. Engel в «стрельчатых арках, эллиптических дугах, окружностях» находил не что иное, как подтверждение установленного им «закона развития животной клетки». По этому закону следует оценивать отношения видов в отдельных экземплярах костей, конституированными элементами. Например, должны совпадать диаметр полости костномозгового пространства с длиной системы костномозговой ткани, а ширина ядра клетки — с шириной внешней стенки, которые предписывают диаметр костномозгового пространства<sup>17</sup>.

Engel описывает, в частности, архитектуру бедренной и большеберцовой костей<sup>18</sup>, а также представляет иллюстрацию архитектуры фронтального сечения вертлужного конца бедренной кости<sup>19</sup>. Здесь, в силу его исторического интереса, я воспроизвел этот рисунок (рис. 4). Несмотря на общую тенденцию, при сравнении этого рисунка с рис. 6а почти везде выявляются большие погрешности. Эти ошибки свидетельствуют о том, как был далек Engel от правильного понимания архитектуры кости<sup>20</sup>.

В Англии в 1858 г. за Engel с объяснениями механического устройства костной ар-

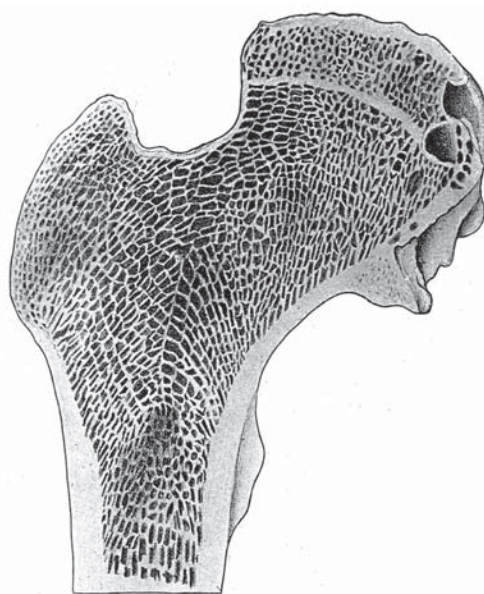


Рис. 4. Изображение Engel той же архитектуры (1851).

хитектуры последовал G.M. Humphry<sup>21</sup>. Все изложенное этим автором свидетельствует о тщательном наблюдении и поражает точностью деталей. Так, например, Humphry выяснил, что окончания балок губчатого слоя располагаются перпендикулярно к суставным поверхностям. Зато факт прямоугольного перекрещивания балок по всем точкам обоюдного касания остался абсолютно неясным.

«Интересно наблюдать, — отмечает Humphry<sup>22</sup>, — способ организации пластин в костях конечностей, располагающихся перпендикулярно к суставной поверхности и, следовательно, судя по характеру давления, служащих самой эффективной опорой».

Архитектуру фронтального сечения вертлужного конца бедренной кости Humphry описывает следующим образом<sup>23</sup>: «Заслуживает комментария расположение костных пластин, выстраивающих решетку. Они обеспечивают максимальную прочность в верхнем конце кости и в параллельных соединениях вершины головки, где переносится наибольший вес, нисходя к внутренней стенке диафиза, усиленной близостью

<sup>17</sup> I. c. S. 593.

<sup>18</sup> I. c. S. 600.

<sup>19</sup> I. c. S. 677 und 678.

<sup>20</sup> Engel был знаком с нормальной архитектурой и понимал ее значение и имел представление о способности патологических отношений к преобразованию архитектуры. «Архитектоника патологически новообразованных частей кости, — пишет он на с. 678, — в целом чрезвычайно интересно отличается от физиологической; но это тем не менее не входит в мои планы»; на с. 683: «...Только когда патологическое состояние захватывает новые костные массы, разрушая либо просто отесняя, ломая и отклоняя правильную конструкцию»; но об этом поговорим в другой раз. Здесь Engel упомянул о стандарте отношений патологически измененной кости, о математическом значении архитектуры, что определяет суть установленного мною закона трансформации кости, но только при патологических отношениях происходят изменения «закона роста животной клетки». Уместно вспомнить следующее замечание Engel: «...Существует перспектива выздоровления патологических отношений, и хотя я так много мог выяснить об этом, но не случилось».

<sup>21</sup> Humphry. A treatise of the human skeleton. Cambridge 1858.

<sup>22</sup> I. c. p. 11.

<sup>23</sup> I. c. p. 474.

малого вертела. Другие пластины следуют от окружности внутренней части стенки, расширяя движение выше малого вертела, соединяя вверху шейку с большим вертелом, таким образом, формируя серию арок, поддерживающих стенку шейки. Большой вертел, располагающийся на наружной границе, передает вес и имеет очень легкую структуру, т.е. тонкую решетку, огораживающую крупные ячейки».

В работе Humphry о распределении губчатого слоя в скелете есть довольно скудные иллюстрации<sup>24</sup>, не воспроизведенные здесь, так как я демонстрирую более ранние рисунки Bourgey и Jacob, Ward, Wyman и Engel (рис. 1–4).

Позднее, в 1861 г., в Германии W.A. Freund<sup>25</sup> в своих лекциях демонстрировал характеристики типичного расположения губчатого слоя тазовых костей. Он полагал, что центр давления туловища лежит в наклонной области первого крестцового позвонка, а точки передачи тяжести крестцом с одной стороны – на вершине вертлужной впадины, а с другой – в седалищном бугре. Между верхней и одной из нижних точек пролегают две костные арки, отличающиеся прочностью, возводя преграду лобкового торца и через костную связку защищаясь от разрушения горизонтальным распором. За способы стоять (ходить) и сидеть отвечают эти два элемента.

Между тем при упоминании работ цюрихского анатома Hermann von Meyer, которому обычно приписывается открытие архитектуры (строения) губчатого слоя, подчеркивают, что он не имел предшественников.

Тем не менее значительная заслуга в изучении внутренней архитектуры кости принадлежит Hermann von Meyer, который в 1867 г. гораздо точнее и наиболее подробно, чем его предшественники, детально описал направления, проходящих в губчатом слое опорных балок костей туловища человека и истолковал их значение.

Большая заслуга этого архитектурного открытия математического значения принадлежит также и цюрихскому математику, профессору Culmann<sup>26</sup>. Он обосновал новое научное направление – «графическую статику» (дисциплину, на первый взгляд, несвойственную области медицины) – и, «будучи высоко квалифицированным инженером, рассчитал удивительные стальные конструкции, перекрывающие “неощутимым сводом” пролеты над морскими рукавами, реками и руслами рек и холлами наших грандиозных строений»<sup>27</sup>. Вместо предоставления, согласно требованиям, частей конструкции в цифрах, он, по тем же правилам графической статики, предъявил письменное изображение в масштабе. Подобный способ позволил исследовать сложные металлоконструкции наиболее наглядно и тщательно, что невозможно при работе с числами<sup>28</sup>.

Для науки представился весьма счастливый случай, когда в Цюрихе в Обществе исследования природы Н. von Meyer демонстрировал препараты. Туда были приглашены ученые. Среди присутствовавших оказался гениальный основатель графической статики профессор Culmann.

<sup>26</sup> Culmann был немцем. Он родился в 1821 г. в Bergzabern в Rheinpfalz, где его отец был священником. Его обучение закончилось в Karlsruhe. В 1852 г. он стал штатным инженером по строительству железных дорог при баварском правлении. Несколькими годами позже, в 1854 г., он принял предложение основать политехническую школу в Цюрихе. Несмотря на многочисленные лестные предложения, он там оставался до конца жизни (ум. 9 декабря 1881 г.). См.: Vgl. Geitel: „Natur und Technik“ Polytechnisches Centralblatt, Organ der polytechnischen Gesellschaft zu Berlin 1889. Nr. 1 S. 6.

<sup>27</sup> Разумеется, как Rühlmann в его истории технической механики, рождение уже в первой трети нашего столетия графического изображения – использование и привлечение к делу проекции в искусстве (как, например, у каменотеса и плотника) – также заслуживает внимания решение поставленных строительно-технических проблем. «Чрезвычайный успех, сопровождающий заслуги Culmann, состоит в том, что он был тем, кто разработал более новую геометрию как средство для решения статических проблем в области инженерного дела, и из всего, что уже было сделано в этом направлении до него, создал строго научную систему» (Vgl. Geitel Polytoohn. Contralblatt 1. c).

<sup>28</sup> Vgl. Ceitel e. 1.

<sup>24</sup> Vgl. e. 1. PI. XXVII. XXXVIII. XLI.

<sup>25</sup> Freund Tageblatt der Dresdener Versammlung Deutscher Naturforscher und Aerzte 1868 S. 73. Vgl. auch Freund Gynäcologische Klinik. Strassburg 1878. S. 14.

Без этого удачного обстоятельства мы, вероятно, надолго бы отстали в изучении внутренней архитектуры кости и до сегодняшнего дня могли бы не придерживаться той точки зрения, которую уже в 30-е годы нашего столетия занимали Bourgerу во Франции и Ward в Англии.

При ближайшем рассмотрении препаратов Meуer, Culmann отметил, что многие части тела человека построены по тем же линиям, что и балки губчатого слоя, соответствуя изображению тел, схожих по форме, а именно — устройству соответствующих костей под воздействием силы.

Они изображали «кран», то есть «изогнутость», в виде балки, обеспечивающей подъем и перенос грузов, контуром, схожим с верхним концом бедренной кости человека, находящейся под статической нагрузкой. Заинтересовываясь все сильнее, он оставил этот «кран» под личным контролем. Движение и энергия вовлекли и его учеников. И каков результат! Действительно оказалось, что природное направление этих костных балок было совершенно идентично в верхнем конце бедренной кости.

Открытие Culmann разделил с Н. von Meуer в 1867 г. в первой работе об архитектуре губчатого слоя<sup>29</sup>. На основании этого открытия он выяснил, что кортикальный слой костей необходимо воспринимать как сжимаемый губчатый слой балок. Ссылаясь на это, в дальнейшем он предопределил новый путь исследования костных связей — путь математического моделирования скелета.

Однако в дальнейшем Meуer отказался от использования открытого Culmann точного математического значения графиков сжатия и растяжения и вследствие этого он упустил факт детального разбора самого важного момента — прямоугольного перекреста балок губчатого слоя и столкновения концов балок с внешней поверхностью кости под прямым углом.

Meуer не только нигде не говорит о прямоугольном пересечении, но это также следует из его схемы, иллюстрирующей внутреннюю архитектуру верхнего конца бедренной

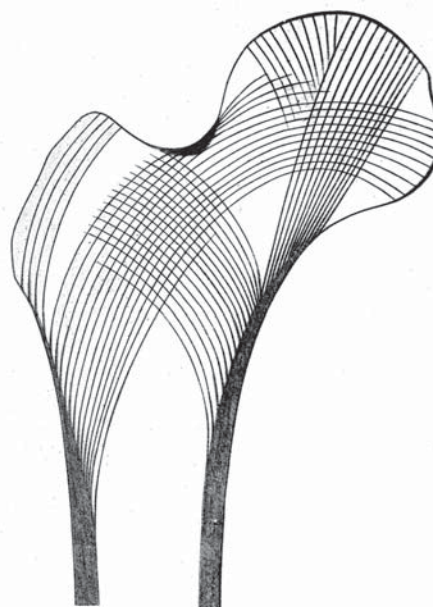


Рис. 5. Схематическое изображение архитектуры Н. von Meуer (1867).

кости (рис. 5), что и оказало помощь рисункам Bourgerу и Jacob, Ward, Wyman und Engel и прямо указывает на то, что Meуer не был знаком с прямоугольным перекрещиванием. На этих иллюстрациях видно, что в месте максимального пересечения поднимающихся балок медиальной тонкой стороны с латеральной стороной угол не прямой, а острый либо тупой. На рисунке Meуer в той же степени концы балок не выглядят вертикальными к поверхности кости, а чаще имеют тупой или острый угол<sup>30</sup>.

Мои собственные исследования<sup>31</sup> подтверждают значение открытия Culmann. Прежде всего, я исследовал место распила срединной части кости, следуя опыту Bourgerу, Engel, Wyman и Н. von Meуer, изучая кость послойно. На паровой машине «Hess», для распила слоновых костей, я распиливал кость на максимально тонкие листы. Благодаря этому я мог каждый раз видеть поперечное положение губчатого слоя кости на протяжении (в объеме) отдельно по одному единственному или почти единственному

<sup>29</sup> Н. von Meуer. Die Architectur der Spongiosa. Reichert and Du Bois-Reymond's Archiv 1987 S. 627.

<sup>30</sup> Vgl. unten 5. Cap.

<sup>31</sup> J. Wolff. Über die Bedeutung der Architectur der spongiösen Substanz. Centralblatt für die medizinischen Wissenschaften 1869 No. 54 und J. Wolff Ueber die innere Architectur der Knochen etc. Virchow's Archiv 50 Bd. 1870. S. 389.

срезу. Таким образом, рисунок костной архитектуры складывался намного ясней, чем когда предлагалось изображение середины распиленной кости. Пластины спонгиозы, что особенно хорошо видно на фанероподобных слоях, представлены в виде балок или столбов и следуют математическим линиям.

Наряду с этим мой метод имел преимущество. Подобный препарат в форме листа необходим для детального изучения, так как позволяет качественнее освободить ячейки губчатого слоя от костного мозга, составляющего внутреннюю ткань кости, чем просто распиленная кость. Весьма сильная струя воды, из крана с узким выходным отверстием либо из крана, суженного пробкой, со стеклянной трубкой в центре, быстро и достоверно дает представление о прочности внутренней ткани ячеек фанероподобного листа, без разрушения тонких балок губчатого слоя. Это привело к тому, что большая часть фанероподобных слоев пропускала свет, и структурные особенности распознавались лучше, чем на препаратах жителя Hessen. Наконец, польза метода фанероподобных листов заключается в том, что он позволяет изготавливать чрезвычайно поучительные и изысканные фотографии, в особенности если они выполнялись на черном бархате, усиливающим контраст.

Таким образом, имея иллюстрации архитектуры губчатого слоя<sup>32</sup>, я мог окончательно убедиться в заживлении. На рисунке ба представлено фотолитографическое изображение верхнего конца правой бедренной кости 15-летнего юноши (фронтальный вид спереди, показывающий продольный слой). Разрез проходит не точно через середину кости, скорее — примерно по границе передней и средней трети, и, соответственно, внизу касается передней стенки диафиза кости. В следующей главе будет представлено подробное описание направления костных балок на препарате, еще не окостеневших, так же как уничтоженных стыков хряща и бедренного вертела.

Важнейшее открытие, к которому я имел отношение, — это исследование с математической точки зрения перекрещивания балок

губчатого слоя под прямым углом как закона, действующего для всех костей, открытие нейтрального хода балок, проходящих в нейтральном волокнистом слое вертлужного конца бедра и, наконец, открытие вогнутой давлением и движением балки в слоях перегородки костномозговой поверхности диафиза бедра.

Дальше я поставил еще одну задачу — математически отследить идентичность хода костных балок, через тягу и кривую давления, и для лучшего понимания представить медицинскому сообществу процесс заживления на языке математики.

Успеха в математических исследованиях мне удалось достичь за счет поддержки Culmann, благодаря которому была подтверждена правота моего изложения.

В дальнейшем к совершенствованию теории стандартной внутренней архитектуры кости и ее математического представления имели отношение Wolferrmann<sup>33</sup>, Zaaijer<sup>34</sup>, Aeby<sup>35</sup>, Karl Bardeleben<sup>36</sup>, Paul Langerhans<sup>37</sup>, Bigelow<sup>38</sup>, Dwight<sup>39</sup> и конечно Hermann von Meyer<sup>40</sup>.

<sup>33</sup> Wolferrmann. Beitrag zur Kenntniss der Architectur der Knochen. Reichert's und Du Bois-Reymond's Archiv 1872 S. 312 ff. Mit Taf. XII.

<sup>34</sup> Zaaijer. De architectur der beenderen. Nederlandsch Tijdschrift voor Geneeskunde 1871.

<sup>35</sup> Aeby. Zur Architectur der Spongiosa. Centralblatt für die medicin. Wissensch. 1873 No. 50. S. 786 und Correspondenzblatt für Schweizer Aerzte 1874 No. 7 S. 191.

<sup>36</sup> Karl Bardeleben. Beiträge zur Anatomie der Wirbelsäule. Jena 1874.

<sup>37</sup> Paul Langorhaus. Beiträge zur Architectur der Spongiosa. Virchow's Archiv. 61 Bd. S. 229—241.

<sup>38</sup> Bigelow. The true neck of the femur. The Boston med. and surg. Journ. 1875 1 und 28 ff.

<sup>39</sup> Dwight. On the „True Neck“. Journ. of Anat. and Physiol. 1875 Mo. XVI.

<sup>40</sup> B. v. Meyer. Zar genaueren Kenntniss der Substantia spongiosa der Knochen. Stuttgart 1882. Separatabdruck aus den Beiträgen zur Biologie. „Jubiläumsschrift für von Bischoff.“

<sup>32</sup> Virchow's Archiv 1. c. Taf. X und XI.