

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ ЗАКОН КОЛЕБАНИЙ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ТЕЛА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТОЙКЕ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Скворцов Д.В.

НМФ «МБН», г. Москва

Адрес для переписки dskvorts63@mail.ru Скворцов Дмитрий Владимирович.

Введение

Тело стоящего вертикально человека совершает колебания около некоторого среднего положения. Эти колебания хорошо видны при проведении стабилметрического исследования на динамометрической или специальной стабилметрической платформе. Традиционно данные колебания рассматриваются, как функция от времени для сагиттальной и фронтальной плоскости. Их объединение даёт статокинезиограмму – проекцию траектории колебаний центра давления (ЦД). Анализ процесса колебаний представляет огромный практический интерес, поскольку отражает, как физиологические, так и патологические процессы, происходящие в системе контроля баланса тела. В литературе существуют различные подходы к анализу процесса колебаний ЦД с использованием существенно отличающихся средств (Скворцов Д.В. 2007).

Кроме этого, в ряде исследований отмечено, что колебания ЦД во фронтальной и сагиттальной плоскостях подчиняются определённой закономерности, которая носит название $1/f$ шум. Подчинение данному

закону колебаний ЦД обнаружено в исследованиях (Collins J.J., De Luca C.J. 1993; Maurer C., Peterka R.J. 2005).

Собственно $1/f$ шум известен и имеет проявление в различных областях техники, физики и биологических процессов. Данное явление представляет собой фундаментальную закономерность поведения любых флуктуирующих систем в биологии (Браже А.Р. 2006) и технике. В соответствии с законом $1/f$ происходят флуктуации многих параметров, которые характеризуют динамику процессов в физико-химических системах и живых организмах. Объединяющим для всех процессов, протекающих по закону $1/f$ является то, что такие системы имеют значительное количество различных элементов, способных накапливать энергию и высвободить её по достижении определённого порога. Такой системой является и человек. Состояние баланса стоящего вертикально человека реально определяется многозвенной механической моделью, включающей все суставы, кости, связки, мышцы и сухожилия, кроме этого, на баланс оказывают влияние и внутренние органы грудной и брюшной полостей, процессы дыхания (Bouisset S., Duchêne J.L., 1994; Hodges, P.W. 2002) и сердечной деятельности (Onell A., 2000; Pagnacco G., Heiss D.G., Oggero E., 2001; Conforto S. et al., 2001). Поэтому если на такую систему отсутствуют внешние или внутренние воздействия, то выделение энергии, в данном случае для обеспечения процесса баланса подчиняется закону $1/f$.

Тем не менее, возможность использования данной закономерности, формирования колебаний центра давления (ЦД) для клинического анализа остаётся неясной. Попытке сделать это и посвящена данная работа.

Пациенты и методы

В исследовании принимали участие группы здоровых лиц, больные с глубоким правосторонним гемипарезом и с пограничной психической

патологией. Здоровые взрослые – обследовано две группы с разной установкой стоп. Использовалась установка стоп по Европейскому стандарту (Gagey P.M., Weber B. 1995) и в положении «стопы вместе». Из групп больных для группы с правосторонним глубоким гемипарезом проводилось исследование в соответствии с Европейским стандартом. Группа с пограничной психической патологией исследовалась в положении «стопы вместе». Подробная информация по количеству, полу и возрасту исследуемых групп представлена в таблице -1.

Таблица 1. Возрастной, половой и количественный состав исследуемых групп.

Группа	Всего	Мужчины	Женщины	Возраст
Европейская установка	26	15	11	41±9,5
Стопы вместе	30	14	16	37,07±1,56
Правосторонний гемипарез	54	33	21	44±11,4
Пограничная психическая патология	30	14	16	37,0±1,94

В первые две группы исследования поструральной устойчивости при различных установках стоп были включены здоровые взрослые, не имеющие в анамнезе травм нижних конечностей и позвоночника, последствий неврологических заболеваний, сопровождающихся двигательным дефектом или расстройством равновесия, патологией зрения, требующей постоянной оптической коррекции или изменением полей зрения, последствиями заболеваний среднего уха и лабиринтного аппарата, а так же черепно-мозговых травм. Обращали внимание на отсутствие наследственных заболеваний отоневрологического характера у родственников первой линии, приводящих к расстройству равновесия.

При исследовании баланса в вертикальной стойке обследуемые, которые показывали существенную асимметрию положения ЦД, его

смещение в сагиттальной плоскости или высокую амплитуду колебаний ЦД были исключены из исследования.

Больные с глубоким правосторонним гемипарезом в резидуальной стадии. В исследование включены 54 больных, где причиной гемипареза являлся ишемический или гемморагический инсульт и для трёх больных – черепно-мозговая травма. Средняя давность заболевания составила 3 года. Все больные характеризовались нарушением кровообращения в бассейне средней мозговой артерии слева. Для больных были характерны типичные симптомы глубокого пареза, сопровождающиеся походкой Вернике-Манна. Стабилометрическое исследование проводилось непосредственно в день поступления на стационарное лечение.

Критериями включения в группу больных с пограничной психической патологией были: возраст не старше 55 лет; принадлежность заболевания к классам F41.1 по ICD-10 – 12 человек (40%) с генерализованным тревожным расстройством и 18 человек (60%) с паническим расстройством F41.0 по ICD-10; отсутствие хронических соматических заболеваний в стадии обострения, грубой ортопедической и неврологической патологии, миопия высокой степени.

Стабилометрическое исследование групп больных проводилось непосредственно при поступлении перед началом курса лечения с помощью комплекса «МБН-СТАБИЛО» (НМФ «МБН», Москва). Использовался тест Ромберга. Для групп с установкой стоп по Европейскому стандарту – положение рук вдоль туловища, группы с положением «стопы вместе» использовался усложнённый вариант – руки вытянуты вперед. Регистрация ЦД на плоскость опоры и его колебаний проводилась в течение 51 секунды в каждом положении – с открытыми и закрытыми глазами. Для представления данных использовалась Европейская система координат пациента (Gagey

Р.М., Weber В. 1995). Проводился анализ первых трёх по величине амплитуд колебаний и их частот в сагиттальной и фронтальной плоскостях. Обозначение параметров кодируется следующим образом: «Х» и «Y» – колебания во фронтальной и сагиттальной плоскостях соответственно; «f» - частота колебаний, «а» - амплитуда колебаний; цифры 1, 2 и 3 – порядковый номер амплитуды колебаний.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась методами вариационной параметрической статистики (Лакин Г.Ф., 1990; Гланц С., 1999) средствами электронного табличного процессора Excel с использованием стандартных статистических функций.

Результаты

При анализе амплитуд и частот колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях для групп нормы по данным анализа основных частот колебаний ЦД в сагиттальной и фронтальной плоскости можно отметить одну фундаментальную закономерность. Чем ниже частота колебания, тем больше его амплитуда и, соответственно, чем выше частота колебания, тем ниже его амплитуда. Данное правило хорошо заметно на графике спектра частот у здорового человека (рис. 1).

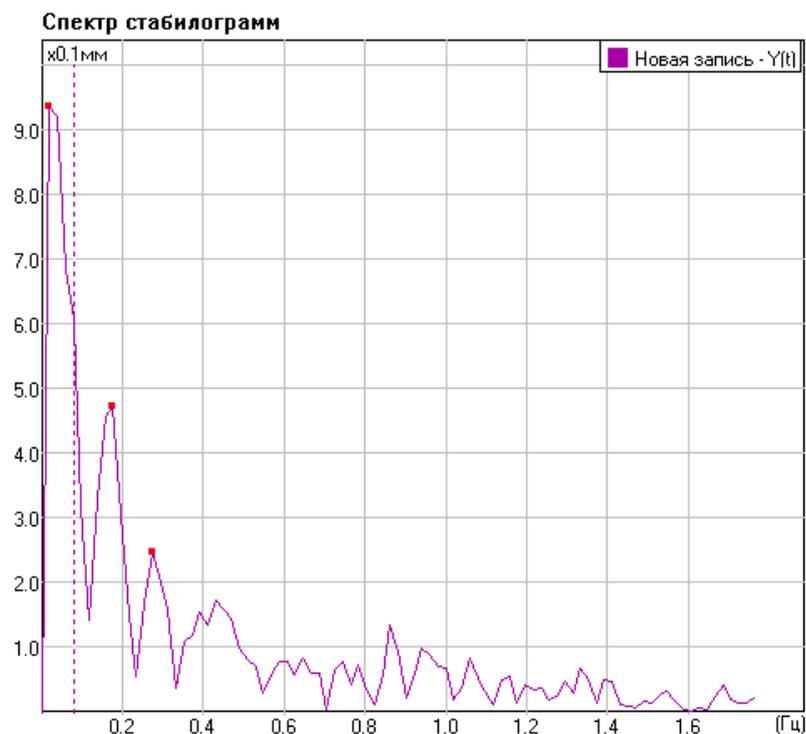


Рисунок 1. Типичный график спектра частот по сагиттальной составляющей (обследуемый С-ин И.И.). Хорошо видно, что колебаний низких частот имеют максимальные амплитуды, а высоких – минимальные.

С целью проверки предположения о наличии такой закономерности для двух групп нормы (с установкой стоп по Европейскому стандарту и с установкой стопы вместе) проведён анализ первых трёх по величине амплитуд колебаний и их частот для сагиттальной и фронтальной плоскости – см. таблицы (табл. 3 и табл. 4).

Таблица 2. Результаты анализа амплитуд и частот колебаний группы нормы с установкой стоп по Европейскому стандарту. *

Параметр	ГО		ГЗ	
	среднее	m	среднее	m
Xf1 (Гц)	0,17	0,021	0,21	0,022
Xa1 (мм)	19,25	1,787	27,59	2,377
Yf1 (Гц)	0,13	0,014	0,17	0,018
Ya1 (мм)	25,60	2,457	39,68	3,491
Xf2 (Гц)	0,21	0,023	0,22	0,030
Xa2 (мм)	14,59	1,656	19,87	1,556
Yf2 (Гц)	0,19	0,017	0,19	0,021

Ya2 (мм)	16,43	1,316	29,14	2,688
Xf3 (Гц)	0,30	0,028	0,25	0,031
Xa3 (мм)	10,18	0,799	16,05	1,345
Yf3 (Гц)	0,27	0,026	0,28	0,030
Ya3 (мм)	11,54	0,869	21,98	1,768

* Где - (ГО) для положений глаза открыты и (ГЗ) глаза закрыты. Даны среднее значение и ошибка среднего ($M \pm m$).

Таблица 3. Результаты анализа амплитуд и частот колебаний группы нормы с установкой стоп – «стопы вместе». *

Параметр	ГО		ГЗ	
	среднее	m	среднее	m
Xf1 (Гц)	0,16	0,025	0,20	0,022
Xa1 (мм)	28,42	2,450	44,08	2,481
Yf1 (Гц)	0,14	0,016	0,16	0,018
Ya1 (мм)	33,93	3,253	41,03	3,273
Xf2 (Гц)	0,25	0,030	0,22	0,022
Xa2 (мм)	18,00	1,432	33,69	2,148
Yf2 (Гц)	0,24	0,033	0,22	0,021
Ya2 (мм)	19,32	1,169	30,41	1,983
Xf3 (Гц)	0,39	0,046	0,29	0,031
Xa3 (мм)	14,92	1,014	25,25	1,624
Yf3 (Гц)	0,29	0,021	0,28	0,026
Ya3 (мм)	15,75	1,151	23,86	1,088

* Где - (ГО) для положений глаза открыты и (ГЗ) глаза закрыты. Даны среднее значение и ошибка среднего ($M \pm m$).

Как можно убедиться, в обеих группах нормы отмеченная выше закономерность строго соблюдается. Колебания, имеющие более высокую частоту, показывают меньшую амплитуду.

Именно по нисходящей происходит изменение амплитуд колебаний с увеличением частоты. Данная закономерность проявляет себя как очень жёсткое правило, которое продолжает соблюдаться и в случае патологии (рис. 2).

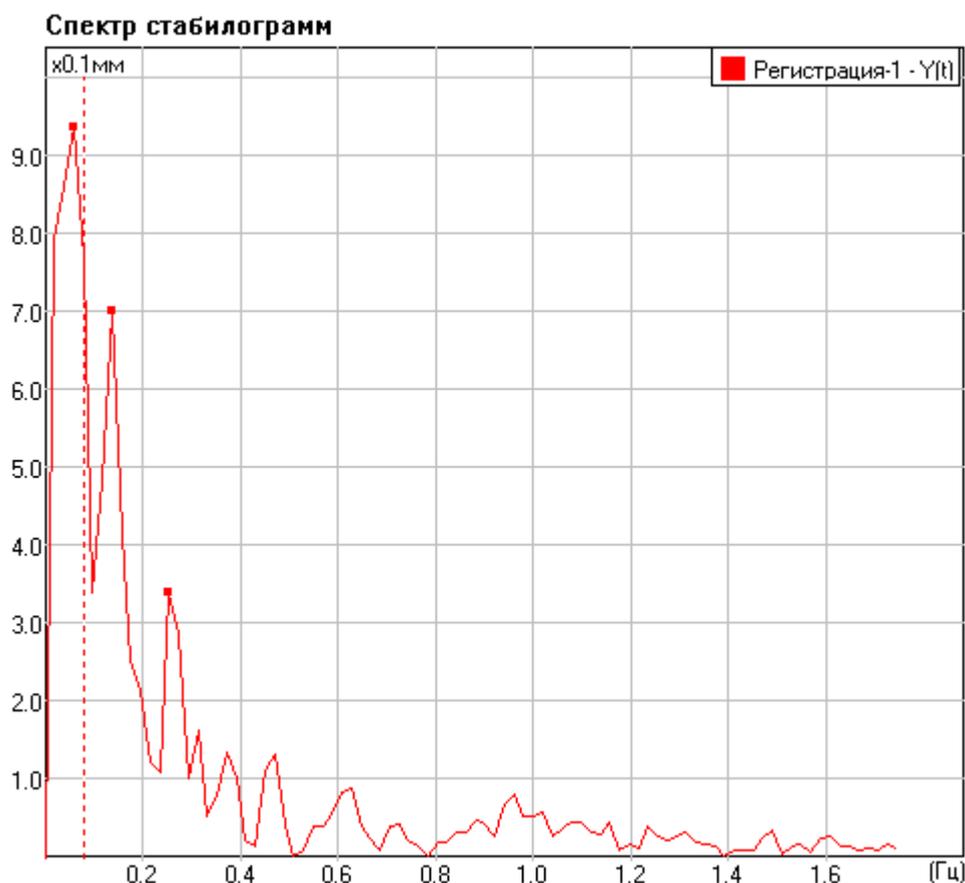


Рисунок 2. Стабилометрическое исследование больной Б-ва Г.И. - последствия гемморагического инсульта, правосторонний гемипарез. Приведён график спектра частот в сагиттальной плоскости. По вертикали – амплитуда в миллиметрах, по горизонтали – частота в герцах.

С целью статистической проверки данного предположения проведён анализ первых трёх по величине амплитуд и соответствующим им частот колебаний в группах больных с правосторонним гемипарезом и больных группы с пограничной психической патологией (первое обследование при поступлении). Итоговые данные представлены в таблицах (табл. 4 и табл. 5).

Таблица 4. Результаты анализа амплитуд и частот колебаний группы больных с глубоким правосторонним гемипарезом. *

Параметр	ГО		ГЗ	
	среднее	m	среднее	m

Xf1 (Гц)	0,14	0,02	0,22	0,02
Xa1 (мм)	36,32	3,95	50,35	4,99
Yf1 (Гц)	0,18	0,02	0,23	0,02
Ya1 (мм)	34,07	2,28	42,78	2,73
Xf2 (Гц)	0,25	0,01	0,23	0,02
Xa2 (мм)	24,05	2,07	35,64	2,97
Yf2 (Гц)	0,26	0,03	0,28	0,03
Ya2 (мм)	22,83	1,46	35,54	2,61
Xf3 (Гц)	0,27	0,02	0,36	0,03
Xa3 (мм)	19,96	1,83	28,52	2,29
Yf3 (Гц)	0,34	0,02	0,31	0,03
Ya3 (мм)	18,97	1,18	30,83	2,24

* Где - (ГО) для положений глаза открыты и (ГЗ) глаза закрыты. Даны среднее значение и ошибка среднего ($M \pm m$).

Таблица 5. Результаты анализа амплитуд и частот колебаний группы больных с пограничной психической патологией. *

Параметр	ГО		ГЗ	
	Среднее	m	Среднее	m
Xf1 (Гц)	0,17	0,02	0,21	0,02
Xa1 (мм)	30,50	1,71	57,96	3,41
Yf1 (Гц)	0,14	0,01	0,19	0,01
Ya1 (мм)	35,77	2,89	51,36	3,69
Xf2 (Гц)	0,29	0,03	0,23	0,02
Xa2 (мм)	19,89	1,09	39,46	2,33
Yf2 (Гц)	0,24	0,02	0,22	0,02
Ya2 (мм)	21,42	1,46	38,13	2,35
Xf3 (Гц)	0,37	0,03	0,33	0,03
Xa3 (мм)	15,34	0,57	31,24	1,56
Yf3 (Гц)	0,31	0,02	0,33	0,02
Ya3 (мм)	16,45	0,91	30,61	1,86

* Где - (ГО) для положений глаза открыты и (ГЗ) глаза закрыты. Даны среднее значение и ошибка среднего ($M \pm m$).

Результат исследования спектра частот колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях групп больных с правосторонним гемипарезом и пограничной психической патологией так же подтверждает строгое

соответствие амплитудно-фазовых характеристик колебаний отмеченной выше закономерности.

Обсуждение

Таким образом, анализ полученных данных, как в группах нормы, так и в группах больных, позволяет сделать следующее заключение. Колебания ЦД в сагиттальной и фронтальной плоскости подчиняются фундаментальной закономерности – **высокоамплитудные колебания являются низкочастотными, а низкоамплитудные - высокочастотными.** Данная закономерность базируется на физической природе процесса колебаний.

В отношении собственно колебаний ЦД во фронтальной и сагиттальной плоскостях: поскольку разделение колебаний на низко и высокочастотные является лишь условным, то на практике это значит, что на графике спектра частот колебания более высокой амплитуды должны иметь меньшую частоту, чем колебания с меньшей относительно них амплитудой. В контексте колебаний ЦД человека, стоящего вертикально, эта закономерность является, как можно убедиться из исследования групп нормы и групп больных – **физиологической постоянной процесса баланса.** Если для групп нормы такой характер колебаний является физиологичным, то для больных исследованных групп, где баланс изначально не является нормальным, обнаруженная последовательность колебаний и их частот может иметь место в случае успешной, физиологичной компенсации. Такое состояние имеет место далеко не всегда. Поэтому, если колебания ЦД не следуют описанной выше закономерности, то такое состояние можно рассматривать как нарушение естественных компенсаторных процессов. В качестве примера приведён график спектра частот колебаний больного Б-ва Е.В. с последствиями ишемического инсульта и правосторонним гемипарезом (рис. 3).

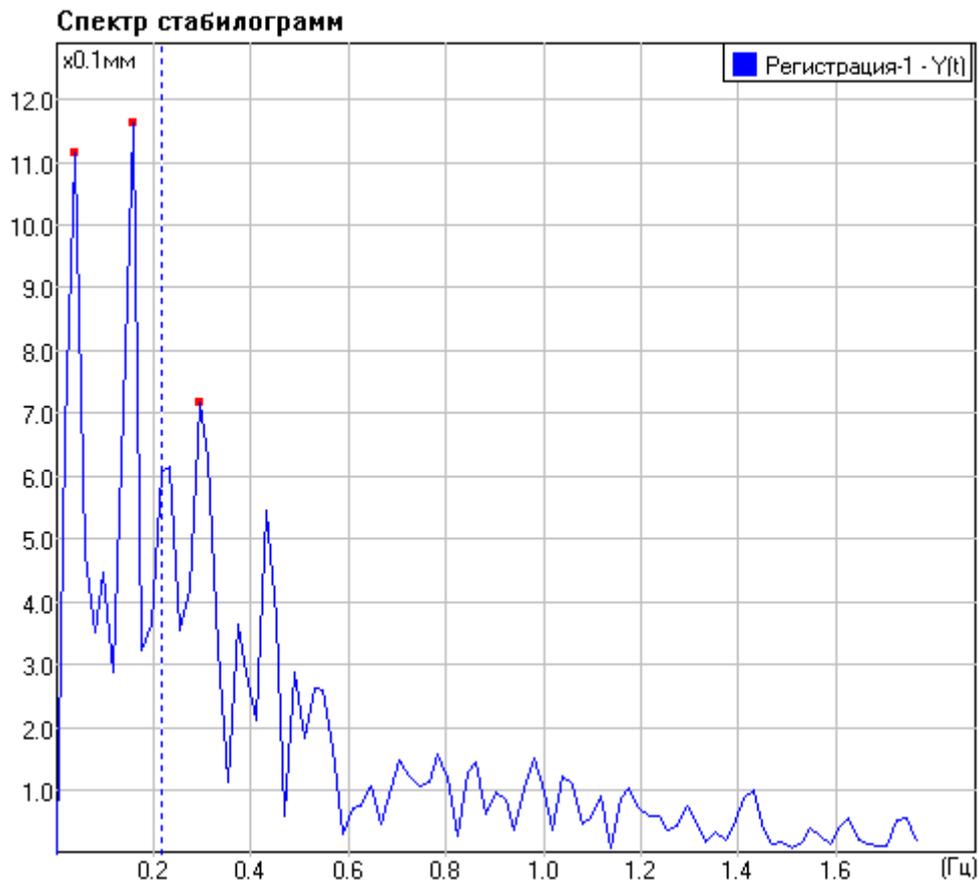


Рисунок 3. График спектра частот колебаний в сагиттальной плоскости больной Б-ва Е.В. – последствия ишемического инсульта, правосторонний гемипарез. По вертикали – амплитуда в миллиметрах, по горизонтали – частота в герцах.

В данном клиническом случае можно видеть, что общая закономерность следования амплитуд и частот остаётся соответствующей описанному фундаментальному правилу, но при этом некоторые амплитуды, имея более высокую частоту, характеризуются и большей, по сравнению с соседними, амплитудой. Аналогичные изменения имеются и в другом случае (рис. 4). На данном графике видно, что после первой максимальной амплитуды колебаний имеется группа из трёх колебаний меньшей амплитуды, после которых следует пик на частоте 0,3 Гц, превышающий амплитуду последних.

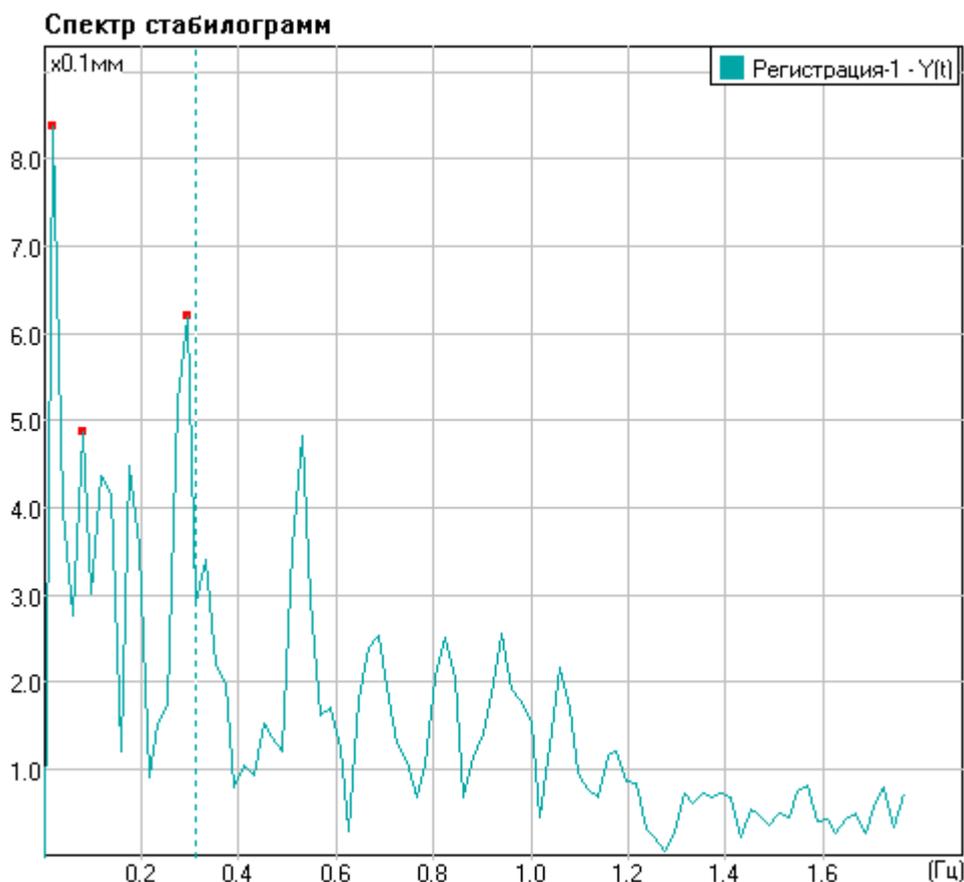


Рисунок 4. График спектра частот колебаний в сагиттальной плоскости больного Д-ко И.Н. – последствия ишемического инсульта, правосторонний гемипарез. По вертикали – амплитуда в миллиметрах, по горизонтали – частота в герцах.

Более показательный случай представлен на рисунке (рис. 5). В данном случае наибольшую амплитуду имеют колебания с частотой 0,28 Гц, после которых какие-либо другие колебания практически отсутствуют. Таким образом, строгая последовательность убывания амплитуд с увеличением частоты колебаний в этом случае нарушена, что можно рассматривать, как изменение физиологической механики балансирующих колебаний принудительно с внесением помех в виде колебаний на частоте 0,28 Гц посредством центральных патологических механизмов.

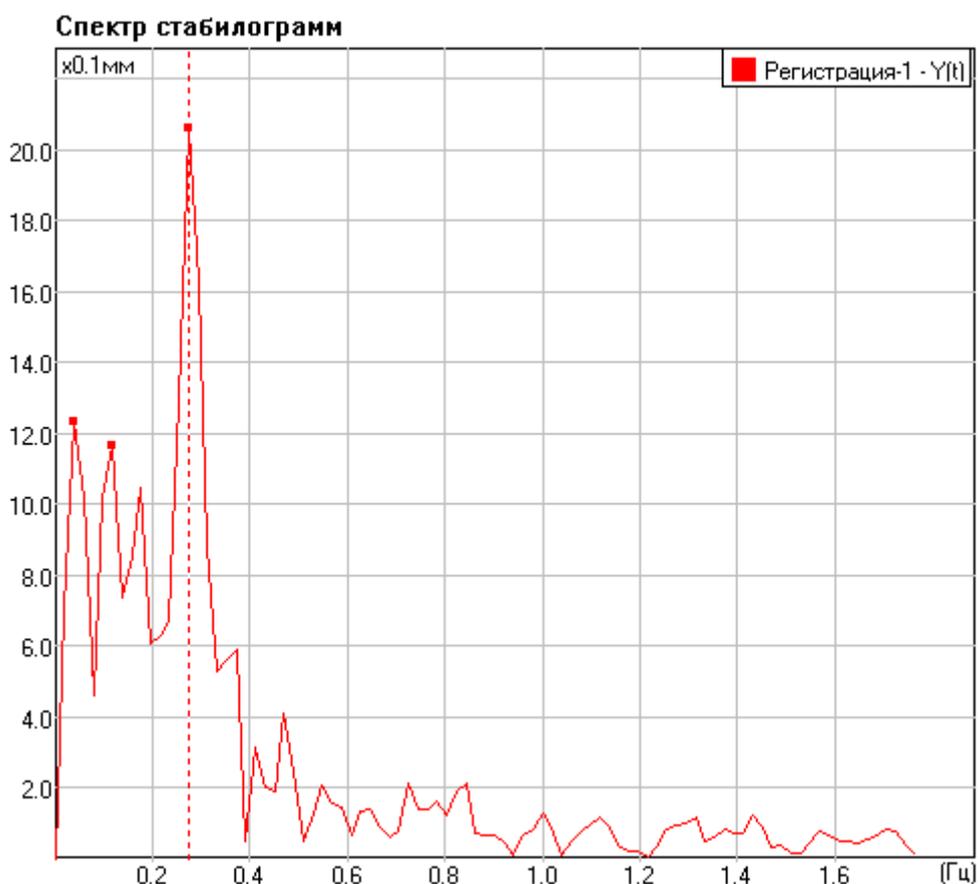


Рисунок 5. График спектра частот колебаний в сагиттальной плоскости больного С-ко В.Я. – последствия черепно-мозговой травмы, правосторонний гемипарез, левосторонняя пирамидная недостаточность, атаксия. По вертикали – амплитуда в миллиметрах, по горизонтали – частота в герцах.

Поскольку обнаруженная закономерность соотношения амплитуды и частоты колебаний носит физический, фундаментальный характер, то данное обстоятельство может быть использовано для анализа данных стабилметрического исследования. Прежде всего, при анализе спектра частот колебаний подчинение спектра закону – величина амплитуды обратно пропорциональна значению частоты: «говорит» о том, что имеющиеся колебания носят свободный характер. В отличие от этого, изменение данного соотношения колебаний и их амплитуд может носить только вынужденный характер, например, за счёт не контролируемого сознательно сокращения мышц (треморы, клонусы) или при изменении чувствительности сенсорного

поля и других причин. При этом свободные колебания, как можно было убедиться из результатов исследования групп нормы и больных с правосторонним гемипарезом и с пограничной психической могут иметь место, как в норме, так и при патологии.

Выводы

1. Колебания центра давления в вертикальной стойке, как для здоровых, так и для больных подчиняются фундаментальному закону $1/f$.
2. Клиническая формулировка закона $1/f$ - высокоамплитудные колебания являются низкочастотными, а низкоамплитудные – высокочастотными.
3. Соответствие спектра частот колебаний данному закону у больного можно рассматривать, как физиологически компенсированное состояние и декомпенсированное при отсутствии такового.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность докторам Кривошей И.В. и Мамичевой Е.Д. за их вклад в данное исследование, сбор и подготовку данных, а так же компании МБН за поддержку этой работы.

Литература

1. Браже А.Р. Фрактальный и вейвлет-анализ электрической активности нервных клеток / Автореф. дисс. канд. биол. н.— М., 2006.— 25 с.

2. Гланц, С. Медико-биологическая статистика / С. Гланц.— М. : Практика, 1999.— 459 с.
3. Лакин, Г. Ф. Биометрия / Г. Ф. Лакин.— М. : Высшая школа, 1990.— 352 с.
4. Скворцов, Д. В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами : анализ походки, стабилметрия / Д. В. Скворцов.— М. : Т. М. Андреева, 2007.— 640 с.
5. Bouisset S., Duchene J.L. Is body balance more perturbed by respiration in seating than in standing posture?// Neuroreport.— 1994.— N5.— P.957-960.
6. Collins J.J., De Luca C.J. The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms // Exp. Brain Res.— 1995.— Vol.103, N1.— P.151-163.
7. Conforto S., Schmid M., Camomilla V. et al. Hemodynamics as a possible internal mechanical disturbance to balance // Gait Posture.— 2001.— Vol.14, N1.— P.28-35.
8. Gagey P.M., Weber B. Posturologie. Regulation et dereglements de la station debout.— Paris: Masson, 1995.— 145 p.
9. Hodges P.W., Gurfinkel V.S., Brumagne S. et al. Coexistence of stability and mobility in postural control: evidence from postural compensation for respiration // Exp. Brain Res.— 2002.— Vol.144, N3.— P.293-302.
10. Maurer, C. A new interpretation of spontaneous sway measures based on a simple model of human postural control / C. Maurer, R. J. Peterka // J. Neurophysiol.— 2005.— Vol.93, N1.— P.189-200.
11. Onell A. The vertical ground reaction force for analysis of balance? // Gait Posture.— 2000.— Vol.12, N1.— P.7-13.

12.Pagnacco G., Heiss D.G., Oggero E. Muscular contractions and their effect on the vertical ground reaction force during quiet stance. Part I: Hypothesis and experimental investigation // Biomed. Sci. Instrum.— 2001.— Vol.37.— P.227-232.