

**ВЛИЯНИЕ ВИБРОТРЕНИНГА ВСЕГО ТЕЛА НА ПЛОТНОСТЬ
БЕДРЕННОЙ КОСТИ, МЫШЕЧНУЮ СИЛУ И КОНТРОЛЬ
ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА У ЖЕНЩИН В ПОСТМЕНОПАУЗЕ:
рандомизированное контролируемое пилотное исследование**

**Verschueren MP S., Roelants M., Delecluse C., Swinnen S.,
Vanderschueren D., Boonen S.**

РЕФЕРАТ. Как показано в экспериментах на животных, высокочастотная механическая нагрузка стимулирует укрепление костной ткани. В настоящем контролируемом рандомизированном исследовании плотность (BMD) бедренной кости была измерена у постменопаузальных женщин после 24 недель вибротренировки всего тела (WBV, whole body vibration – вибрация всего тела, англ.). Вибрационный тренинг значительно увеличивал плотность бедренной кости. Данные результаты говорят, что WBV тренинг может быть полезен в профилактике остеопороза.

Введение. На различных моделях животных было показано, что высокочастотная механическая нагрузка стимулирует укрепление костей. Однако действие вибрационных упражнений на скелет человека изучено мало. Особенно, отсутствуют рандомизированные контролируемые данные по безопасности и эффективности вибрационной нагрузки на женщин в постменопаузе – входящих в группу наибольшего риска по развитию остеопороза. Целью данного рандомизированного контролируемого исследования было оценить костно-мышечные эффекты высокочастотных механических нагрузок посредством действия вибрации всего тела (WBV) у женщин в постменопаузе.

Материалы и методы. 70 добровольцев (в возрасте 58-74 лет) методом случайной выборки были распределены в группу вибротренинга всего тела (WBV, n = 25), группу резистивного тренинга (РЕЗ, n = 22) и группу контроля (КОН, n = 23). Испытуемые WBV и РЕЗ групп тренировались 3 раза в неделю на протяжении 24 недель. WBV группа выполняла статические и динамические упражнения на разгибатели коленного сустава на вибрационной платформе (35-40 Гц, ускорение 2.28-5.09 g), создающей механическую нагрузку на кость и вызывающей рефлекторное сокращение мышц. Испытуемые РЕЗ-группы тренировали разгибатели коленного сустава динамическими прессорно-экстензионными упражнениями на нижние конечности с возрастающим от низкого (20RM) до высокого (8RM) сопротивлением. Группа контроля не участвовала в каком-либо виде тренинга. Плотность бедренной кости измерялась с использованием

денситометра (DXA) до и после 6 месяцев воздействия. Изометрическая и динамическая сила мышц измерялась динамометром (motor-driven dynamometer). Для оценки данных использовался ANOVA (дисперсионный анализ).

Результаты. Никаких побочных эффектов действия вибрации обнаружено не было. Вибрационный тренинг увеличил статическую и динамическую силу мышц (+15% и +16%, соответственно; $p \leq 0.01$), а также значительно увеличил плотность костной ткани (+0.93%, $p \leq 0.05$). Никаких изменений плотности бедренной кости у женщин группы резистивного тренинга и группы контроля обнаружено не было (-0.60% и -0.62%, соответственно; незначительно). Сывороточные маркеры обмена костной ткани не изменялись ни в одной из групп.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о том, что WBV может являться доступным и эффективным способом коррекции общеизвестных факторов риска случайных падений и переломов костей у женщин пожилого возраста, и подтверждают необходимость дальнейших исследований у людей.

J Bone Miner Res 2004; 19:352–359. Published online on December 22, 2003; doi: 10.1359/JBMR.0301245

Ключевые слова: вибрация всего тела, механическая нагрузка, резистивный тренинг, остеопороз.

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку продолжительность жизни населения в мире увеличивается, остеопороз и переломы вследствие остеопороза становятся все более важными проблемами здравоохранения. В любом случае, проксимальный перелом бедра является самым серьезным осложнением остеопороза. Смертность у пациентов с переломом бедра на 12-20% выше, чем у людей того же пола и возраста без перелома. Из тех, кто перенес операционное вмешательство по поводу перелома бедра вследствие остеопороза, лишь 1/3 сохраняют свой прежний, до перелома, функциональный статус. Большинство стратегий по лечению потери костной массы в постменопаузе сосредоточено на противорезорбтивных лекарственных препаратах. С недавних пор определенное внимание стала привлекать возможность применения силовых упражнений для сохранения плотности костной ткани и профилактики остеопороза. Однако данный подход имеет собственный недостаток в виде отсутствия долговременного комплайенса и может даже увеличивать риск переломов. Следовательно, крайне важно продолжать поиск более подходящих, безопасных программ упражнений с целью улучшения результата.

В последнее время, Rubin с соавт. доказал на модели животных, что имеющие низкую степень риска, высокочастотные механические ускорения

могут оказывать сильный остеогенный эффект. В своем исследовании они обнаружили значительное увеличение качества и количества трабекулярной костной ткани у овец после воздействия низкоуровневых высокочастотных механических стимулов. Высокочастотный нагрузочный режим, действовавший на овариэктомированных крыс, был эффективен против ранней потери костной массы. В целом, данные эксперименты доказывают, что вибрационная нагрузка имеет потенциальную возможность для предупреждения и лечения остеопороза. Тем не менее, у постменопаузальных женщин – кто входит в группу наивысшего риска по развитию переломов вследствие остеопороза – влияние такого вида воздействия на качество костной ткани (и, косвенно, на риск переломов) не определено.

Целью настоящего рандомизированного контролируемого исследования было, таким образом, оценить костно-мышечные эффекты высокочастотного вибротренинга всего тела (WBV) на женщин в постменопаузе. Как известно, вибрационный тренинг является безопасным и эффективным методом развития мышечной силы. Во время вибрационной сессии испытуемый стоит на вибрационной платформе, генерирующей вертикальные синусоидальные вибрации с частотой между 35 и 40 Гц. Механические стимулы передаются в организм, где создают нагрузку на костную ткань и также стимулируют чувствительные рецепторы (скорее всего, мышечные веретена). Активация этих рецепторов приводит к рефлекторной активации двигательных единиц, подобно таковой при тоническом вибрационном рефлексе.

Мы предположили, что в дополнение к увеличению силы мышц вследствие индуцированной вибрацией мышечной активности, высокочастотная нагрузка скелета может улучшать его механическую прочность у постменопаузальных женщин. Общая плотность бедренной кости была выбрана в качестве основной конечной точки данного исследования, поскольку на ее измерение не влияют дегенеративные изменения, и имеет высокий прогноз в отношении риска перелома бедра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект и дизайн исследования

В исследовании приняли участие 70 добровольцев женского пола. Оценка пригодности для участия основывалась на скрининге по опроснику и медицинского обследования. Женщины должны были быть в возрасте 60-70 лет, не находящимися на стационарном лечении и не имеющими заболеваний или принимающими препараты, влияющие на костный метаболизм и мышечную силу. Лица с T-показателем общей плотности костей ниже -2.5 (принятое ВОЗ определение остеопороза) были также исключены из исследования. Все испытуемые методом случайной компьютерной выборки были распределены в одну из исследуемых групп. В общем числе 25 женщин тренировались в течение 6 месяцев на вибрационной платформе (WBV

группа). Группа из 22 женщин занималась по программе резистивного тренинга (РЕЗ группа). Обе тренировочные программы состояли из 72 тренировочных сессий в течение 24-недельного периода. Частота тренировок – 3 раза в неделю, с как минимум 1 днем отдыха между двумя сессиями. Группа из 23 женщин была оставлена как группа контроля, и не участвовала ни в каком тренинге. Базовые характеристики по всем группам представлены в Таблице 1. Все участницы предварительно дали свое письменное информированное согласие, протокол исследования одобрен Этическим комитетом Университета Лувена.

Таблица 1. Базовые характеристики вибрационной группы (WBV), резистивной группы (РЕЗ) и контрольной (КОН) группы (среднее значение \pm SD)

	WBV (n = 25)	RES (n = 22)	CON (n = 24)	p Value
Age (years)	64.6 \pm 3.3	63.90 \pm 3.8	64.2 \pm 3.1	0.79
Years since menopause	16.9 \pm 6.3	15.5 \pm 6.0	14.6 \pm 6.6	0.47
Body mass (kg)	66.5 \pm 8.9	70.47 \pm 9.6	68.56 \pm 14.5	0.75
Height (m)	1.59 \pm 0.05	1.61 \pm 0.06	1.60 \pm 0.06	0.39
BMI (kg/m ²)	26.34 \pm 3.6	27.4 \pm 3.5	26.51 \pm 5.8	0.70
BMD whole body (g/cm ²)	1.02 \pm 0.09	1.01 \pm 0.08	1.03 \pm 0.06	0.84
BMD proximal femur (g/cm ²)	0.88 \pm 0.14	0.84 \pm 0.09	0.84 \pm 0.11	0.64
BMD lumbar spine (g/cm ²)	0.90 \pm 0.14	0.90 \pm 0.14	0.93 \pm 0.14	0.71
Osteocalcin (ng/ml)	36.4 \pm 7.4	33.7 \pm 8.3	32.4 \pm 6.3	0.71
C-telopeptide (ng/ml)	0.416 \pm 0.159	0.454 \pm 0.154	0.477 \pm 0.244	0.55
Isometric strength (N.m)	113.0 \pm 22.0	115.6 \pm 24.2	114.3 \pm 21.1	0.17
Dynamic strength (N.m)	81.1 \pm 15.2	89.2 \pm 16.0	83.7 \pm 15.4	0.24
Fat mass (g)	24131 \pm 5583	25332 \pm 6507	25914 \pm 9144	0.68

WBV

Испытуемые WBV группы выполняли статические и динамические разгибательные упражнения на вибрационной платформе («PowerPlate», Амстердам, Нидерланды): присед, глубокий присед, широкий присед, присед на одной ноге и выпад. Тренировочная нагрузка была низкой в начале, но постепенно увеличивалась, согласно «принципу отягощения». Тренировочный режим систематически нарастал на протяжении всего 6-месячного тренировочного периода путем увеличения продолжительности одной вибрационной сессии, числа серий одного упражнения или количеством различных упражнений. Интенсивность тренинга увеличивалась путем укорочения времени отдыха или повышением амплитуды (низкая – 1.7 мм; высокая – 2.5 мм) и/или частоты (35-40 Гц) вибрации. В дополнение к этому, тренировочная нагрузка увеличивалась сменой выполнения упражнений с преимущественно на двух ногах на упражнения на одной ноге. Продолжительность WBV программы была максимум 30 минут, включая разминку и восстановление.

Пиковое ускорение синусоидального вибрационного стимула – согласно записям акселерометра (MTN 1800; Monitran, Bucks, UK) – варьировало между 2.28g и 5.09g (среднеквадратическое ускорение между 13.5 и 34.6 м/с²). Как измерено на платформе, только часть от 5g ускорения

передавалась через стопы на бедренные кости и позвоночный столб. Однако точный коэффициент передачи неизвестен. Биполярные поверхностные ЭМГ (Myosystem 2000, Noraxon, Scottsdale, AZ, США), записанные с прямой мышцы бедра и камбаловидной мышцы, иллюстрируют влияние вибрационного тренинга на мышечную активность (Рисунок 1). Во время вибрационных сессий испытуемые были обуты в одинаковую гимнастическую обувь, чтобы стандартизировать демпфирование вибрации обувью.

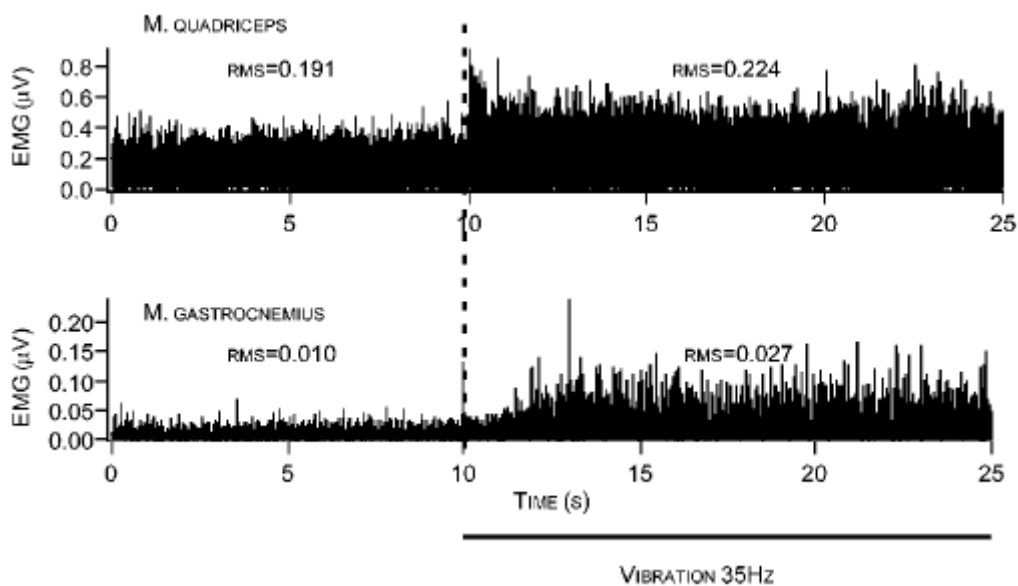


Рисунок 1. Увеличенная мышечная активация в прямой мышце бедра и камбаловидной мышце во время вибрационного тренинга. RMS – среднеквадратическое значение ректифицированной ЭМГ в период без и с вибрацией.

Резистивный тренинг

Испытуемые РЕЗ группы тренировались в спортивном центре Университета Лувена. Они начинали со стандартной разминки, включавшей 20 минут ходьбы, бега или езды на велосипеде. Интенсивность таких кардиоваскулярных упражнений автоматически контролировалась по частоте сердечных сокращений (Technogym Systems, Gambetolla, Italy) и методично увеличивалась с 60 до 80% резерва частоты сердцебиений, рассчитанного по формуле Karvonen. После разминки испытуемые выполняли программу резистивного тренинга для разгибателей коленного сустава на leg extension and leg press machine (Technogym Systems). Программа резистивного тренинга составлена согласно рекомендациям Американского Колледжа Спортивной Медицины (ACSM) для людей старше 60 лет: 10-15 повторений до момента наступления волевого утомления с целью улучшения мышечной силы и выносливости. В течение первых 14 недель тренинга интенсивность систематично возрастала с двух сетов 20 repetition maximum (RM) до двух сетов 15 RM, двух сетов 12 RM, двух сетов 10 RM и в итоге до двух сетов 8

RM. В последние 10 недель объём и интенсивность тренинга варьировали между тремя сетами 12 RM и одним сетом 8 RM. В общей сложности каждая РЕЗ программа длилась около 1 часа.

Контрольная группа

Контрольным испытуемым полагалось поддерживать их текущий уровень физической активности на протяжении 24 недель исследования и не заниматься каким-либо новым видом упражнений. Испытуемые заполнили подробный опросник их физической активности в начале исследования и далее с интервалом каждый месяц.

Оценка плотности костной ткани (BMD)

BMD бедренной кости и всего тела были измерены денситометрически (DXA) с использованием аппарата QDR-4500A (Hologic, Waltham, MA, USA) на исходном уровне и через 6 месяцев. Использовалось стандартное положение с переднезадним сканированием проксимального отдела правой бедренной кости. Безжировая масса тела, жировая масса и процент жира были получены путем DXA-сканирования всего тела. Все сканирование было выполнено одним и тем же опытным специалистом, не осведомленным касательно типа вмешательства на пациента. Коэффициент вариации (CV) для общего DXA-измерения бедренной кости в нашей лаборатории составляет 0.56%.

Оценка обмена костной ткани

На исходном уровне и спустя 6 месяцев, уровни сывороточного остеокальцина и С-телопептида (СТХ) были определены в качестве маркеров формирования и резорбции костной ткани, соответственно. В данные моменты времени у всех испытуемых была забрана кровь натощак и заморожена при -70°C до анализа. Циркулирующий остеокальцин измерялся с использованием радиоиммунного анализа. Сывороточный СТХ оценивался методом перекрестного иммуоферментного анализа (Osteometer BioTech, Herlev, Denmark).

Измерение мышечной силы

Сила разгибателей коленного сустава оценивалась изометрическими и динамическими тестами на динамометре (motor-driven dynamometer, REV 9000; Technogym Systems).

Изометрическая сила. Испытуемые дважды выполняли максимальное произвольное мышечное сокращение разгибателей колена. Угол в коленном суставе составлял 130° . Изометрические сокращения длились 3 секунды, и разделялись 2-минутным перерывом. Максимальная вращающая сила (Н·м) регистрировалась в качестве изометрической силовой характеристики. CV для измерения изометрической силы в нашей лаборатории составляет 3.7%.

Динамическая сила. Испытуемые выполняли серии из четырех последовательных изокинетических сгибательно-разгибательных движений

против рычага динамометра, двигающегося со скоростью 100° в секунду. Экстензия в коленном суставе начиналась с угла в суставе 90° и заканчивалась при 160°. После каждой экстензии нижняя конечность пассивно возвращалась в стартовую позицию, откуда немедленно начиналось следующее сокращение. Максимальная вращающая сила определялась как пиковая вращающая сила (Н·м), записанная в течение данных серий экстензий в коленном суставе. CV для измерения динамической силы в нашей лаборатории составляет 3.3%.

Оценка постурального контроля

Позное колебание измерялось до и по истечении 24-недельного периода посредством «Vertec force plate», соединенной с системой сбора данных «CED Micro 1401» и с использованием программного обеспечения spike2. Постуральный контроль каждого испытуемого тестировался в четырех положениях: стоя в тишине с открытыми глазами, стоя в тишине в жидкокристаллических очках, стоя в тишине после нарушения спокойствия (возмущения) в виде быстрого отведения рук до горизонтального положения и стоя в тишине после быстрой антефлексии рук до горизонтальной позиции. Постуральный контроль оценивался в WBV и КОН группах, но не в РЕЗ группе.

Статистический анализ

Для оценки исходных различий среди WBV группы, РЕЗ группы и КОН группы использовался односторонний дисперсионный анализ (ANOVA). Эффекты от воздействий анализировались посредством повторных измерений ANOVA. Далее была найдена F величина, достоверная для взаимосвязи между группой и временем, и выполнены заданные сравнительные анализы для оценки достоверности «до-после» изменений в каждой группе. Поправка Bonferroni использовалась для приведения величины p в зависимость от количества выполненных сравнений. Все анализы были выполнены с использованием пакета программ Statistica (version 6, Statsoft, Hamburg, Germany). Уровень достоверности установлен при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Никаких значительных различий не было обнаружено на базовом уровне между экспериментальными и контрольными группами в отношении возраста, веса, массы тела, лет с момента наступления менопаузы, плотности костной ткани (BMD), сывороточных уровней остеокальцина и С-телопептида (СТХ), изометрической и динамической силы мышц, жировой массы и безжировой массы тела (Таблица 1).

Изометрическая сила разгибателей коленного сустава увеличилась на 15% (95% CI, 10.6 – 19.5; $p \leq 0.001$) в WBV группе и на 16% в РЕЗ группе (95% CI, 9.1 – 23.9; $p \leq 0.001$). В контрольной группе было незначительное снижение на 2% (95% CI, -6.9-2.01; $p = 0.57$). По сравнению с контрольной

группой, 6-месячное вибрационное воздействие привело к значительному 17.6% нетто-улучшению изометрической силы четырехглавых мышц ($p \leq 0.001$; Таблица 2). Подобное улучшение было обнаружено в РЕЗ группе (+18.9% против КОН группы, $p \leq 0.001$).

Таблица 2. Средние значения изменений и корреляции между группами в мышечной силе, плотности бедренной кости и состава тела в течение периода воздействия

	WBV group	CON group	Between-group difference	
			Mean	p Value
Isometric strength	+15.10	-2.49	17.59	<0.001
Isotonic strength	+16.47	+2.23	14.24	<0.001
Total hip BMD	+0.93	-0.62	1.55	0.005
Total body BMD	+0.44	-0.28	0.72	0.24
Muscle mass	-0.08	-1.2	-1.12	0.57
Fat mass	-2.3	+0.5	2.8	0.09

	WBV group	RES group	Between-group difference	
			Mean	p Value
Isometric strength	+15.10	+16.49	-1.39	0.99
Isotonic strength	+16.47	+10.59	5.88	0.54
Total hip BMD	+0.44	+0.14	0.30	0.01
Total body BMD	+0.93	-0.51	1.44	0.99
Muscle mass	-0.08	+0.06	-0.14	0.99
Fat mass	-2.3	-3.1	0.66	0.99

	RES group	CON group	Between-group difference	
			Mean	p Value
Isometric strength	+16.49	-2.49	18.98	<0.001
Isotonic strength	+10.59	+2.23	8.36	0.05
Total hip BMD	+0.14	-0.28	0.42	0.99
Total body BMD	-0.51	-0.62	0.11	0.99
Muscle mass	+0.06	-1.2	1.26	0.37
Fat mass	-3.1	+0.5	-3.60	0.01

Динамическая сила увеличилась на 16.5% (95% CI, 9.4 – 23.5) и 10.6% (95% CI, 5.6 – 15.5) в WBV группе и РЕЗ группе, соответственно ($p \leq 0.001$). В группе контроля значительных изменений обнаружено не было (+2.2%; (95% CI, -1.5-5.9; $p = 1.14$)). И снова, WBV и РЕЗ группы показали значительную чистую эффективность по истечению времени, в сравнении с КОН группой (+14.2% и +8.4%, соответственно; $p \leq 0.001$).

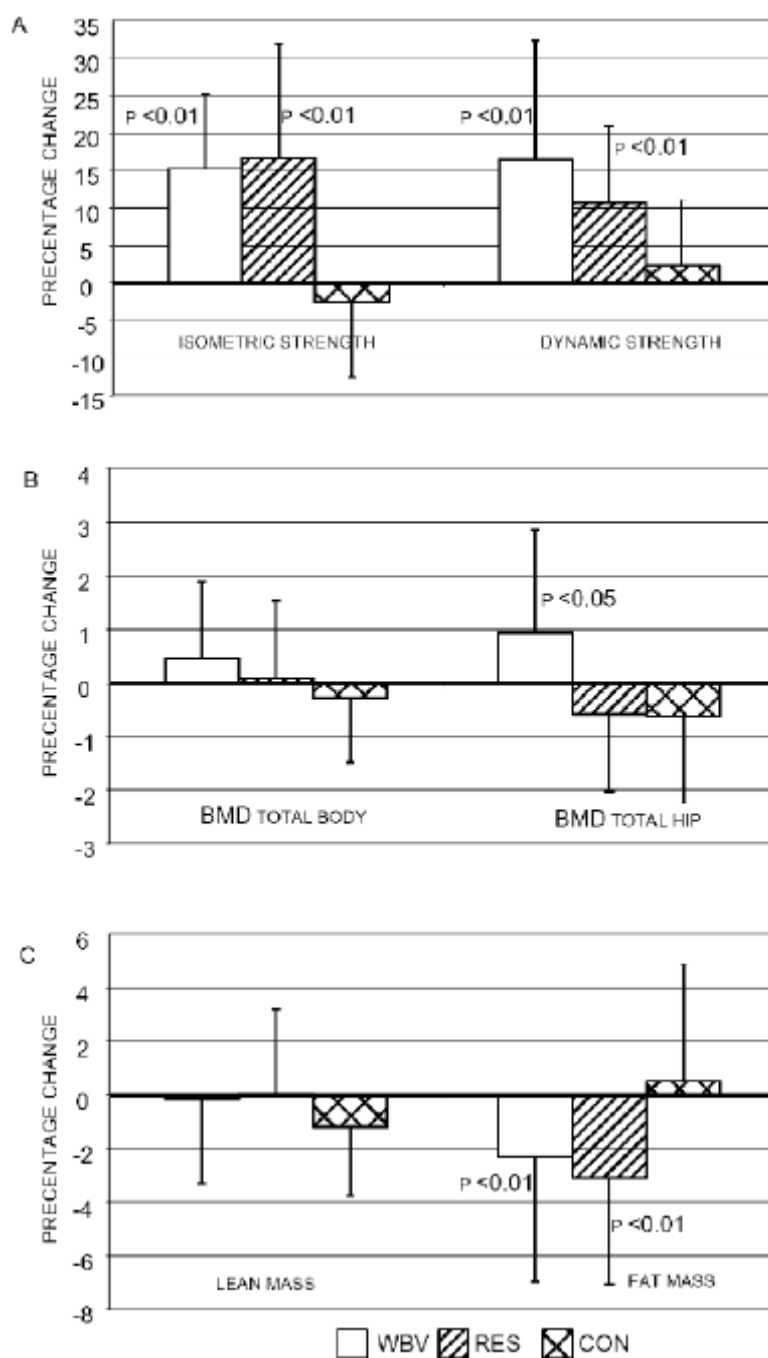


Рисунок 2. Процентные изменения через 24 недели в (А) изометрической и динамической мышечной силе, (В) общей BMD бедренной кости и всего тела и (С) безжировой и жировой массе по трем экспериментальным группам (WBV, РЕЗ, КОН).

Как показано на Рисунке 2, общая BMD бедренной кости по истечению времени увеличилась в группе WBV тренинга (+0.93%; 95% CI, 0.13 – 1.71; $p=0.03$), в то время как никаких достоверных изменений BMD бедренной кости обнаружено не было у женщин-испытуемых группы резистивного тренинга или контроля (-0.51%; 95% CI, -1.13 до -0.11; $p=0.41$ и -0.62%; 95% CI, -1.30-0.07; $p=0.16$, соответственно). В сравнении с РЕЗ группой, 6-месячное вибрационное воздействие привело к значительному 1.51% чистому (нетто-)улучшению в общей BMD бедренной кости ($p \square 0.05$).

Подобное нетто-улучшение (1.53%, $p \leq 0.01$) обнаружено в сравнении с КОН группой. Улучшение в общей BMD бедренной кости было статистически не соотносимо с увеличением изометрической или динамической силы ($r = -0.23$, $p = 0.29$ и $r = 0.28$, $p = 0.20$, соответственно).

Прирост мышечной силы в WBV и РЕЗ группах не ассоциирован со значительными изменениями в безжировой массе тела (Таблица 3). Тем не менее, в обеих группах общая масса жира существенно снизилась за период воздействия (-2.3%; 95% CI, -4.3 до -0.4; $p = 0.01$ в WBV группе и -3.1%; 95% CI, -4.9 до -1.3; $p \leq 0.001$ в РЕЗ группе). Напротив, значительных изменений в жировой массе в КОН группе обнаружено не было (+0.5%; 95% CI, -1.3-2.4, $p = 0.60$).

Таблица 3. Мышечная сила, плотность бедренной кости, обмен костной ткани и состав тела на исходном уровне и после 6 месяцев воздействия

	WBV group	RES group	CON group	Between-group difference for the change over time (p Value)*
BMD whole body (g/cm ²)				
Baseline	1.027 ± 0.099	1.016 ± 0.078	1.030 ± 0.068	
6 months	1.031 ± 0.096	1.016 ± 0.077	1.027 ± 0.069	0.21
BMD femur (g/cm ²)				
Baseline	0.878 ± 0.136	0.841 ± 0.094	0.846 ± 0.109	
6 months	0.886 ± 0.134 [†]	0.836 ± 0.098	0.840 ± 0.105	0.003
BMD L ₁ -L ₄ (g/cm ²)				
Baseline	0.904 ± 0.143	0.900 ± 0.136	0.926 ± 0.146	
6 months	0.901 ± 0.145	0.901 ± 0.135	0.930 ± 0.146	0.33
Osteocalcin				
Baseline	36.4 ± 7.3	33.7 ± 8.2	32.4 ± 6.3	
6 months	30.9 ± 5.4	34.7 ± 4.5	33.5 ± 5.4	0.19
C-telopeptide				
Baseline	0.416 ± 0.160	0.454 ± 0.154	0.477 ± 0.244	
6 months	0.332 ± 0.128	0.411 ± 0.166	0.379 ± 0.198	0.33
Isometric strength (Nm)				
Baseline	113.0 ± 22.0	115.7 ± 24.2	114.3 ± 21.0	
6 months	131.3 ± 23.8 [†]	132.5 ± 22.1 [†]	110.6 ± 19.0	<0.001
Isotonic strength (Nm)				
Baseline	81.1 ± 15.2	89.2 ± 16.0	83.7 ± 15.4	
6 months	94.8 ± 16.2 [‡]	97.9 ± 16.7 [‡]	85.4 ± 16.1	<0.001
Muscle mass (g)				
Baseline	40030 ± 3853	41305 ± 4323	39877 ± 5125	
6 months	39967 ± 3802	41339 ± 4510	39357 ± 4828	0.25
Fat mass (g)				
Baseline	24131 ± 5583	25332 ± 6507	25914 ± 9144	
6 months	23550 ± 5499*	24504 ± 6466 [‡]	26044 ± 9307	0.01

Эффекты WBV тренинга на поструральный контроль суммированы в Таблице 4. Позное колебание (среднеквадратическое значение и полная peak-to-peak амплитуда) в позициях до возмущения с открытыми и закрытыми глазами при действии WBV тренинга не изменялось (данные не представлены). После быстрого короткого отведения рук полная амплитуда колебания в переднезаднем направлении значительно снизилась после WBV тренинга ($p \leq 0.05$). Подобным образом, полная амплитуда колебания в медиолатеральном направлении после быстрой антефлексии рук

существенно уменьшилась благодаря WBV тренингу ($p=0.05$). Никакой из данных параметров не изменился после 24 недель в КОН группе.

Таблица 4. Постуральное колебание после отведения или антефлексии рук на исходном уровне и после 6 месяцев воздействия

	WBV group	COM group	Between-group difference for the change over time*
Abduction A-P (mm)			
Baseline	9.6 ± 3.3	7.7 ± 2.1	
6 months	8.1 ± 2.2 [†]	8.6 ± 3.4	0.003
Abduction M-L (mm)			
Baseline	4.4 ± 1.2	3.9 ± 1.1	
6 months	4.0 ± 1.2	4.1 ± 1.1	0.10
Anteflexion A-P (mm)			
Baseline	9.1 ± 2.7	8.3 ± 1.9	
6 months	8.7 ± 1.9	8.4 ± 1.4	0.59
Anteflexion M-L (mm)			
Baseline	4.7 ± 1.7	4.2 ± 1.1	
6 months	4.1 ± 1.0 [†]	4.4 ± 1.2	0.03

ОБСУЖДЕНИЕ

Имеется всё возрастающее доказательство, что силовая нагрузка оказывает очень важное функциональное влияние на костную массу. Увеличение костной плотности после нагрузок демонстрирует, что костная ткань приспосабливается к изменениям в ее механическом окружении; данный процесс позволяет скелету противостоять «строгостям функциональной активности». Однако, особенно у пожилых, чрезмерные силовые нагрузки могут увеличивать риск повреждений. Более того, есть доказательство, что остеогенный эффект силовых нагрузок может снижаться с возрастом. Тем не менее, поиск альтернативных стратегий, с целью сделать нагрузки менее рискованными и/или увеличить эффективность адаптационной реакции костной ткани на нагрузку, продолжается. Тренировочный принцип, представленный здесь, потенциально предлагает такую стратегию для женщин в постменопаузе, поскольку, как показали результаты, 24 недели WBV тренинга – что оказывает механическую нагрузку на кости и вызывает рефлекторные мышечные сокращения – не ассоциировались с побочными эффектами вибрации и привели к увеличению плотности костной ткани (BMD). Среднее изменение суммарной BMD бедренной кости в WBV группе (включая чистую, нетто-пользу около 1.5% после 6 месяцев, по сравнению с контролем) аналогично таковой величине увеличения BMD (бедренной кости), полученной при применении антирезорбтивных препаратов в течение 6 месяцев в недавних исследованиях по остеопорозу, учитывая их *потенциальную* клиническую значимость. Нами не было обнаружено эффекта вибрационного воздействия на скорость костного обмена, указывающее на то, что позитивное влияние на BMD не

является результатом снижения резорбции костной ткани. Учитывая отсутствие значительных изменений в общей скорости обмена костной ткани, никаких изменений не было обнаружено в суммарной BMD всего организма или поясничного отдела позвоночника, свидетельствующее о том, что данные эффекты вибрации на BMD бедренной кости – результат локального (сайт-специфичного) воздействия вибрационной нагрузки.

В добавление к приросту BMD, и это не было неожиданным, испытуемые вибрационной группы продемонстрировали улучшение восстановления равновесия после баллистического отведения или антефлексии верхних конечностей, увеличение (изометрической и изокинетической) мышечной силы и снижение жировой массы. Изменения мышечной силы были аналогичны по величине таковым в группе резистивного тренинга. Однако, прирост BMD в течение 6-месячного воздействия был статистически не соотносим с увеличением изометрической или динамической силы, что свидетельствует о том, что остеогенный эффект не был опосредован рефлекторными мышечными сокращениями. Данное предположение подтверждается тем фактом, что прирост экстензионной силы нижних конечностей в группе резистивного тренинга не имел прямой зависимости с сопутствующим увеличением плотности костной ткани.

Контролируемые исследования по нагрузкам показывают, что самыми остеогенными являются нагрузки высокой амплитуды и высокой частоты. Нагрузочный режим, обеспеченный программой WBV тренинга в настоящем исследовании, сочетал обе данные характеристики. Общепринято, что высокоамплитудные сигналы, свойственные интенсивной функциональной активности, определяют костную морфологию. Нагрузка на кости линейно возрастает с увеличением силы гравитации. В нашем исследовании сила гравитации ранжировалась от 2.5 раз увеличения веса тела в начале программы до 5-кратного увеличения веса тела с 3 недели воздействия. Нагрузку на скелет во время вибрационного воздействия можно оценить как нагрузку высокой интенсивности, подобно влиянию, оказываемому в таких видах спорта, как баскетбол, волейбол, спринт. В этом отношении, результаты данного исследования согласуются с предыдущими исследованиями, показавшими положительные эффекты упражнений высокой интенсивности на плотность костной ткани. Предполагается, что нагрузка снижает скорость резорбции костной ткани и увеличивает ее формирование, пропорционально пиковой величине нагрузки. Однако, в то время как нами обнаружено увеличение плотности костной ткани в вибрационной группе спустя 6 месяцев, позитивных эффектов высокоинтенсивных упражнений на BMD после одного года тренировок четко выявлено не было.

Тем не менее, есть основание предполагать, что вибрация высокой частоты (35-40 Гц, то есть нагрузка высокой интенсивности) может играть ключевую роль в раннем остеогенном эффекте, обнаруженном в нашем исследовании. В то время как нагрузка в 1 Гц должна превышать 1000 микрострейн, чтобы стимулировать формирование костной ткани, нагрузке в

30 Гц достаточно воздействовать с силой 50 микрострейн, чтобы достигнуть таких же результатов. Опыты на животных, выполненные Rubin с соавт., доказали, что такие низкоуровневые высокочастотные механические стимулы могут оказывать анаболический эффект на (трабекулярную) костную ткань. В их экспериментах на взрослых овцах, гистоморфометрическое обследование бедренной кости после 1 года стимуляции выявило увеличение костной массы к общей массе на 32%, что привело к увеличению прочности трабекулярной костной ткани на 27%. Однако, хотя костная морфология и структура были существенно усилены, никаких изменений не было установлено денситометрически (DXA). Это позволило Rubin сделать заключение, что если изменения идентифицируются денситометрически (DXA), как в нашем исследовании, то такие изменения нужно считать релевантными.

В одном из последних исследований хорошего дизайна на здоровых молодых людях, Torvinen не обнаружил эффекта WBV тренинга на массу, структуру и оцененную прочность костной ткани. Авторы предположили, что одной из причин такого отсутствия ответа могло быть хорошее базовое физическое состояние молодых испытуемых, и их костно-мышечный аппарат не имел особенных физиологических потребностей для адаптации к вибрационной нагрузке. По их мнению, ответ костной ткани на вибрацию возможен у пожилых людей, как в нашем случае. Однако Torvinen также упомянул, что вибрационный стимул может варьировать по разным характеристикам (включая его тип, амплитуду, частоту и продолжительность), и различные типы вибрационной нагрузки способны оказывать различные эффекты на костную массу и структуру. В их исследовании, ежедневная продолжительность стимула составляла лишь 4 минуты, три-пять раз в неделю, что значительно меньше, чем 20-минутный стимул в нашем исследовании. Их стимул мог быть недостаточным, чтобы вызвать адаптацию.

В настоящее время механизм, лежащий в основе остеогенного эффекта высокочастотной стимуляции, полностью не ясен. Rubin с соавт. предположили, что адаптационный ответ костной ткани на высокочастотные стимулы может быть не прямым следствием деформации костной ткани (как при высокоинтенсивных нагрузках), а скорее опосредоваться промежуточными продуктами высокочастотного нагрузочного сигнала, такими как касательное напряжение (shear stress), происходящее из жидкостного потока. С другой стороны, за адаптивным ответом костной ткани на высокочастотную нагрузку может стоять так называемый стохастический резонанс (stochastic resonance). Стохастический резонанс представляет собой феномен, когда механический шум (широкополосная частота вибрации) увеличивает ответ нелинейной системы на слабый сигнал путем усиления его сверх порога. Предыдущие исследования показали, что стохастический резонанс способен увеличивать чувствительность различных механорецепторов нашего тела, как например мышечных веретен. Недавние свидетельства *in vivo* и *in vitro* говорят, что (кортикальное) формирование

кости в ответ на механическую нагрузку может увеличиваться при добавлении шума к (высокоинтенсивному) режиму упражнений. Такака с соавт. показали, что вибрационный стимул, добавленный к низкочастотной, высокоамплитудной нагрузке усилил остеогенный ответ на нагрузку почти в 4 раза. В настоящем исследовании мы применяли и высокоамплитудную нагрузку, и высокочастотный вибрационный стимул. Таким образом, стохастический резонанс мог способствовать увеличению BMD.

Среди некоторых профессий (к примеру, водители тракторов, пилоты и др.) обнаружена (потенциальная) взаимосвязь между длительным воздействием WBV и поясничной болью. Тем не менее, доказательство ассоциации «доза-реакция» слабое, и все еще остается не ясным, существует ли случайная связь между профессиональной WBV и поясничной болью. Как указано, мы не обнаружили никаких побочных эффектов вибрации. В частности, поясничная боль или другие симптомы или повреждения отсутствовали. Наши кратковременные наблюдения согласуются с предшествующими сообщениями Rittweger и соавт., недавно выполнившими рандомизированное контролируемое исследование с целью сравнения экстензионных упражнений в поясничном отделе и WBV-упражнений для лечения хронических болей в пояснице. Тем не менее, мы подтверждаем, что отсутствие условий безопасности в контексте 6-месячного исследования на здоровых добровольцах не исключает возможности долгосрочных побочных эффектов на неподобранных пожилых лицах. Необходимо дальнейшее исследование долгосрочной безопасности WBV тренинга для пожилых женщин.

Наше исследование имеет ограничения, и результаты должны интерпретироваться в контексте его дизайна. Хотя мы обнаружили значительное увеличение BMD от базового уровня в вибрационной группе и существенные различия между группами, мы подтверждаем, что количество наблюдений было небольшим. Как указывалось, мы можем лишь рассуждать о механизмах, лежащих в основе данного увеличения BMD, и о том, в какой степени это увеличение отражает различные эффекты на кортикальную и трабекулярную костную ткань. Остается много вопросов, такие как сохраняются ли данные кратковременные результаты с течением времени, и как было бы возможным в дальнейшем оптимизировать тренировочный протокол в отношении остеогенных эффектов. Мы выбрали тренировочную программу на вибрационной платформе, вероятно оказывающей положительное воздействие на мышечную и костную ткань. Возможно, высокочастотная или даже широкополосная вибрация низкой амплитуды, прилагаемая с несколько большими нагрузками в прерывистые интервалы, может быть более остеогенной (но теряя в развитии силы). Также, наши результаты не могут быть обобщенными, поскольку испытуемые были здоровыми и не являлись случайной выборкой из общей популяции пожилых людей. В конечном счете, полезность и безопасность данного вида тренинга в долгосрочной профилактике постменопаузального остеопороза и переломов вследствие остеопороза остаются неизвестными.

В заключение, у здоровых женщин в постменопаузе 24-недельная программа вибрации всего тела является выполнимой и возможной для коррекции мышечной силы, координации и плотности костной ткани, общеизвестных факторов риска переломов бедра. Необходимы дальнейшие исследования на человеке для подтверждения данных кратковременных наблюдений и последующего изучения возможностей вибрационной нагрузки в профилактике и лечении остеопороза.

БЛАГОДАРНОСТИ

Steven Boonen является действительным членом Рабочей группы ASBMR по скелетно-мышечной реабилитации. Авторы выражают благодарность всем, кто принял устное участие в настоящем исследовании. Также говорят спасибо G Van der Meer, J Tempelaars и N De Poot за помощь в составлении дизайна тренировочной программы; докторам E Van den Eede и K Pardaens за медицинский скрининг испытуемых; и H Borgs и H Peeters за руководство денситометрическими (DXA) измерениями. Настоящее исследование поддержано Грантом G.0171.03 Фонда Scientific Research-Flanders, Belgium (F.W.O.-Vlaanderen) для Steven Boonen. Verschueren MP Sabine является postdoctoral fellow Фонда Research-Flanders, Belgium. Steven Boonen является заведующим кафедрой метаболических заболеваний костной ткани Университета Лувена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kannus P, Parkkari J, Niemi S 1995 Age-adjusted incidence of hip fractures. *Lancet* **346**:50–51.
2. Autier P, Haentjens P, Bentin J, Baillon JM, Grivegnée AR, Closon MC, Boonen S 2000 Costs induced by hip fractures: A prospective controlled study in Belgium. *Belgian Hip Fracture Study Group. Osteoporos Int* **11**:373–380.
3. Magaziner J, Simonsick EM, Kashner TM, Hebel JR, Kenzora JE 1990 Predictors of functional recovery one year following hospital discharge for hip fracture: A prospective study. *J Gerontol* **45**: M101–M107.
4. Gutin B, Kasper MJ 1992 Can vigorous exercise play a role in osteoporosis prevention? A review. *Osteoporos Int* **2**:55–69.
5. Lanyon LE 1996 Using functional loading to influence bone mass and architecture: Objectives, mechanisms, and relationship with estrogen of the mechanically adaptive process in bone. *Bone* **18**(Suppl 1):37S–43S.
6. Rubin C, Turner AS, Muller R, Mitra E, McLeod K, Lin W, Qin YX 2002 Quantity and quality of trabecular bone in the femur are enhanced by a strongly anabolic, noninvasive mechanical intervention. *J Bone Miner Res* **17**:349–357.

7. Fliieger J, Karachalios T, Khaldi L, Raptou P, Lyritis G 1998 Mechanical stimulation in the form of vibration prevents postmenopausal bone loss in ovariectomized rats. *Calcif Tissue Int* **63**:510–514.
8. Delecluse C, Roelants M, Verschueren S 2003 Strength increase after whole-body vibration compared with resistance training. *Med Sci Sports Exerc* **35**:1033–1041.
9. Burke D, Schiller HH 1976 Discharge pattern of single motor units in the tonic vibration reflex of human triceps surae. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* **39**:729–741.
10. Cummings SR, Nevitt MC, Browner WS, Stone K, Fox KM, Ensrud KE, Cauley J, Black D, Vogt TM 1995 Risk factors for hip fracture in white women. Study of Osteoporotic Fractures Research Group. *N Engl J Med* **332**:767–773.
11. American College of Sports Medicine 2000. Exercise prescription. In: Franklin BA, Whaley MH, Howley ET (eds.) *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA, USA, pp. 138–139.
12. Karvonen M, Kentala K, Mustala O 1957 The effects of training on heart rate: A longitudinal study. *Ann Med Experimentalis et Biologiae Fenniae* **35**:307–315.
13. American College of Sports Medicine 1998 American College of Sports Medicine Position Stand. Exercise and physical activity for older adults. *Med Sci Sports Exerc* **30**:992–1008.
14. Boonen S, Rosen C, Bouillon R, Sommer A, McKay M, Rosen D, Adams S, Broos P, Lenaerts J, Raus J, Vanderschueren D, Geusens P 2002 Musculoskeletal effects of the recombinant human IGF-I/IGF binding protein-3 complex in osteoporotic patients with proximal femoral fracture: A double-blind, placebo-controlled pilot study. *J Clin Endocrinol Metab* **87**:1593–1599.
15. Bouillon R, Vanderschueren D, Van Herck E, Nielsen HK, Bex M, Heyns W, Van Baelen H 1992 Homologous radioimmunoassay of human osteocalcin. *Clin Chem* **38**:2055–2060.
16. Rosenquist C, Fledelius C, Christgau S, Pedersen BJ, Bonde M, Qvist P, Christiansen C 1998 Serum CrossLaps One Step ELISA. First application of monoclonal antibodies for measurement in serum of bone-related degradation products from C-terminal telopeptides of type I collagen. *Clin Chem* **44**:2281–2289.
17. Rubin C, Turner AS, Mallinckrodt C, Jerome C, McLeod K, Bain S 2002 Mechanical strain, induced noninvasively in the high-frequency domain, is anabolic to cancellous bone, but not cortical bone. *Bone* **30**:445–452.
18. Wolff J 1986 The law of bone remodeling. In: Maquet P, Furlong R (eds.) *Bone Remodeling*. Springer Verlag, Berlin, Germany.
19. Kallinen M, Markku A 1995 Aging, physical activity and sports injuries. An overview of common sports injuries in the elderly. *Sports Med* **20**:41–52.
20. Turner CH, Takano Y, Owan I 1995 Aging changes mechanical loading thresholds for bone formation in rats. *J Bone Miner Res* **10**:1544–1549.
21. Ettinger B, Black DM, Mitlak BH, Knickerbocker RK, Nickelsen T, Genant HK, Christiansen C, Delmas PD, Zanchetta JR, Stakkestad J, Gluer CC, Krueger K, Cohen FJ, Eckert S, Ensrud KE, Avioli LV, Lips P, Cummings SR 1999 Reduction of vertebral fracture risk in postmenopausal women with osteoporosis treated with raloxifene: Results from a 3-year randomized clinical trial. Multiple Outcomes of Raloxifene Evaluation (MORE) Investigators. *JAMA* **282**:637–645.
22. Harris ST, Watts NB, Genant HK, McKeever CD, Hangartner T, Keller M, Chesnut CH III, Brown J, Eriksen EF, Hoseyni MS, Axelrod DW, Miller PD 1999 Effects of risedronate treatment on vertebral and nonvertebral fractures in women with postmenopausal osteoporosis: A randomized controlled trial. *Vertebral Ef-*

- ficacy With Risedronate Therapy (VERT) Study Group. *JAMA* **282**:1344–1352.
23. Rubin CT, Lanyon LE 1985 Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. *Calcif Tissue Int* **37**:411–417.
 24. Turner CH, Owan I, Takano Y 1995 Mechanotransduction in bone: Role of strain rate. *Am J Physiol* **269**:E438–E442.
 25. Frost HM 1990 Skeletal structural adaptations to mechanical usage (SATMU): 1. Redefining Wolff's law: The bone modeling problem. *Anat Rec* **226**:403–413.
 26. Bassey EJ, Littlewood JJ, Taylor SJ 1997 Relations between compressive axial forces in an instrumented massive femoral implant, ground reaction forces, and integrated electromyographs from vastus lateralis during various 'osteogenic' exercises. *J Biomech* **30**: 213–223.
 27. Groothausen J, Siemer H, Kemper HCG, Twisk J, Welten DC 1997 Influence of peak strain on lumbar bone mineral density: An analysis of 15-year physical activity in young males and females. *Pediatr Exerc Sci* **9**:159–173.
 28. Heinonen A, Kannus P, Sievanen H, Oja P, Pasanen M, Rinne M, Uusi-Rasi K, Vuori I 1996 Randomised controlled trial of effect of high-impact exercise on selected risk factors for osteoporotic fractures. *Lancet* **348**:1343–1347.
 29. Rubin CT, Lanyon LE 1987 Kappa Delta Award paper. Osteoregulatory nature of mechanical stimuli: Function as a determinant for adaptive remodeling in bone. *J Orthop Res* **5**:300–310.
 30. Qin YX, Rubin CT, McLeod KJ 1998 Nonlinear dependence of loading intensity and cycle number in the maintenance of bone mass and morphology. *J Orthop Res* **16**:482–489.
 31. Torvinen S, Kannus P, Sievanen H, Jarvinen TA, Pasanen M, Kontulainen S, Nenonen A, Jarvinen TL, Paakkala T, Jarvinen M, Vuori I 2003 Effect of 8-month vertical whole body vibration on bone, muscle performance, and body balance: A randomized controlled study. *J Bone Miner Res* **18**:876–884.
 32. Cordo P, Inglis JT, Verschueren S, Collins JJ, Merfeld D, Rosenblum S, Buckley S, Moss F 1996 Noise in human muscle spindles. *Nature* **383**:769–770.
 33. Tanaka SM, Alam IM, Turner CH 2003 Stochastic resonance in osteogenic response to mechanical loading. *FASEB J* **17**:313–314.
 34. Tanaka SM, Li J, Duncan RL, Yokota H, Burr DB, Turner CH 2003 Effects of broad frequency vibration on cultured osteoblasts. *J Biomech* **36**:73–80.
 35. Lings S, Leboeuf-Yde C 2000 Whole-body vibration and low back pain: A systematic, critical review of the epidemiological literature 1992–1999. *Int Arch Occup Environ Health* **73**:290–297.
 36. Rittweger J, Beller G, Felsenberg D 2000 Acute physiological effects of exhaustive whole-body vibration exercise in man. *Clin Physiol* **20**:134–142.
 37. Rittweger J, Just K, Kautzsch K, Reeg P, Felsenberg D 2002 Treatment of chronic lower back pain with lumbar extension and whole-body vibration exercise: A randomized controlled trial. *Spine* **27**:1829–1834.