

Эффект шепчущей галереи

[«Наука из первых рук» №3, май 2006](#) • [Физика](#)

Сергей Сухинин



Сухинин Сергей Викторович — доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск). Лауреат Госпремии РФ в области науки и техники (2000 г.)

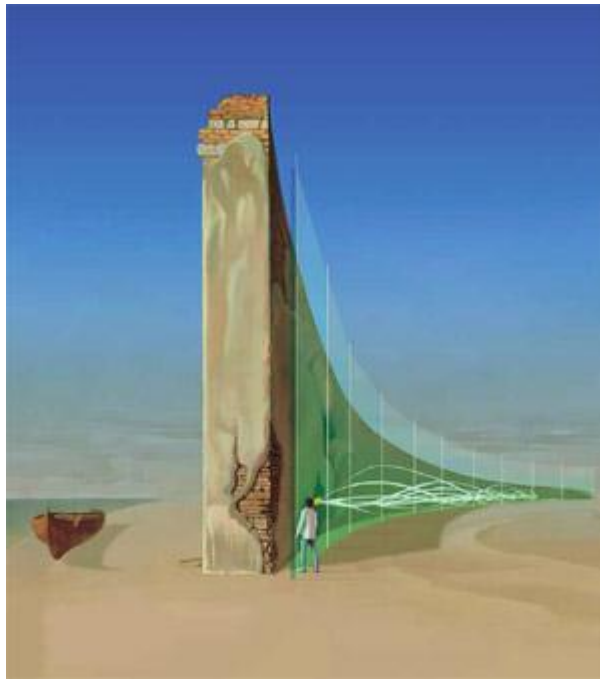
«Шепчущие галереи» — название не совсем правильное: конечно, шепчут не сами стены — перешептываются люди около этих стен, однако устоялся именно этот термин. В мире известно несколько таких шепчущих галерей, стен и зданий, связанных в основном с религиозными святилищами или капищами.

Понятно, что служители соответствующих религиозных культов или управляющие этими строениями всячески поддерживают мнение об их магической исключительности, даже — священной таинственности, потому что это отвечает их интересам.

Подобное мнение навязывается непросвещенной публике посредством умелой, хорошо поданной и широко распространяемой рекламы. Обычному человеку некогда задумываться о реальных, обусловленных законами природы причинах этого таинственного явления.

Из-за нехватки времени или образования он охотно верит в то, что ему внушают. Мы все любим тайны. Толпы туристов и просто любопытных с замиранием сердца перешептываются в этих удивительных строениях.

Автору этих строк было непросто принять решение все-таки написать статью об истинных причинах эффекта шепчущих галерей — слишком широко распространилась в обществе их мистическая слава. Люди часто не любят признавать свои заблуждения, не хотят знать правды. Они любят чудеса, благодаря этому чудеса и существуют.



Однако любой, кто разберется в акустической природе этих таинственных сооружений, при большом желании сможет построить свою собственную шепчущую галерею.

Распространение акустических волн вдоль лучей описывается геометрической акустикой, иногда этот подраздел теории волн называют лучевой теорией. Движение частиц воздуха происходит в направлении распространения акустической волны, вдоль бихарактеристик — лучей. Распространение акустического возмущения вдоль луча очень сильно похоже на движение некоторой частицы. Дуализм волны и частицы одинаково справедлив как для акустических, так и световых (электромагнитных волн) или волн на воде.

Акустический дуализм

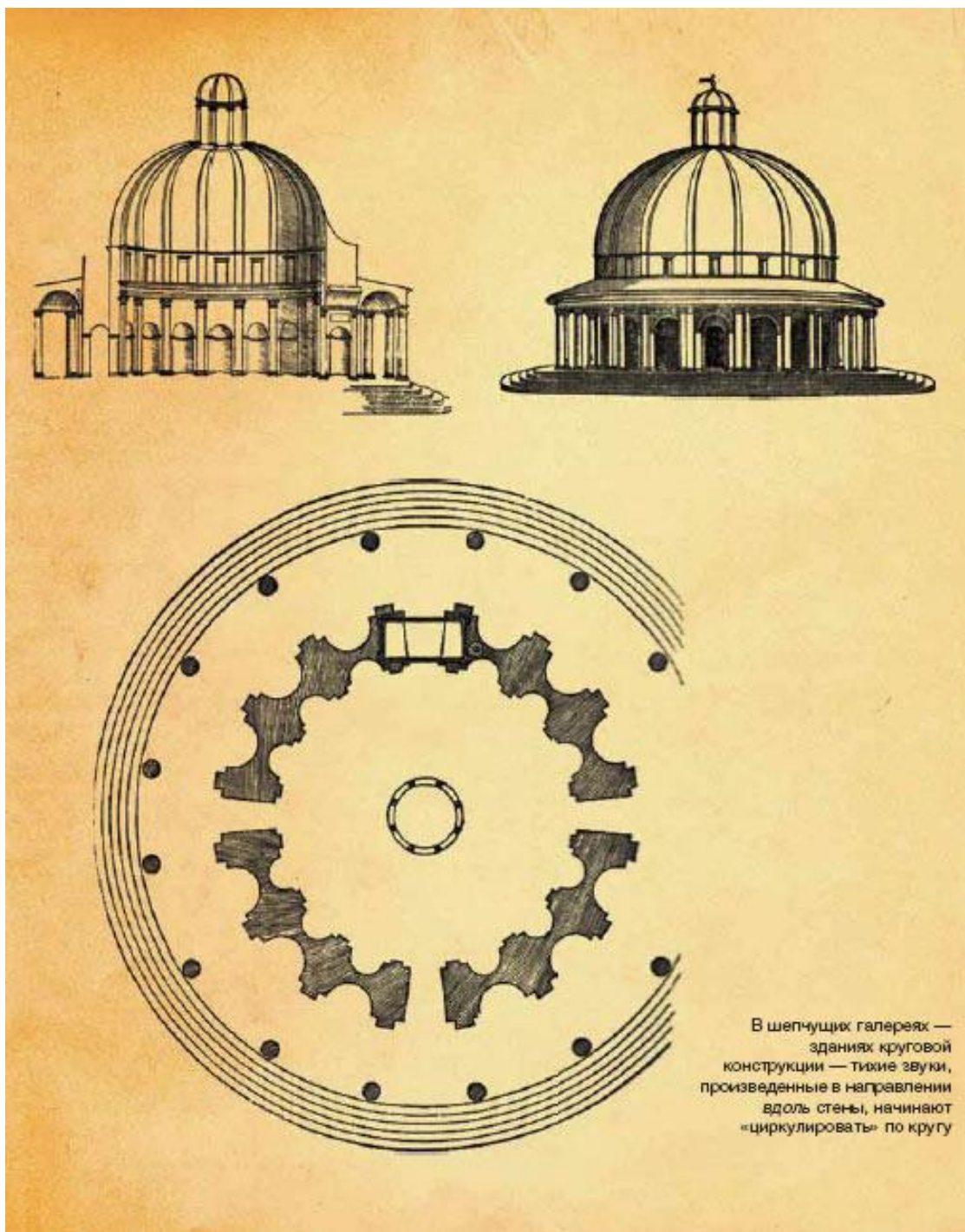


Первое, что мы должны сделать — вспомнить, что представляют собой акустические волны. Этим термином в физике обозначают слабые возмущения давления в воздухе. Распространение акустических волн малой амплитуды описывается линейной гиперболической системой уравнений. Для таких систем уравнений характерно

существование волнового фронта. Возмущения давления распространяются вдоль бихарактеристик этой системы уравнений, которые обычно называются лучами.

Вероятно, поэтому ведется вечная дискуссия: является фотон частицей или волной? Но дискуссия эта чисто терминологическая. Человек существо прагматическое, поэтому обычно выбирает такую точку зрения, которая удобна для вычислений и описания поведения волн. Понятно, что в каждом конкретном случае выбор будет зависеть от исследуемого явления, точнее — от длины волны, размера объекта и т. п.

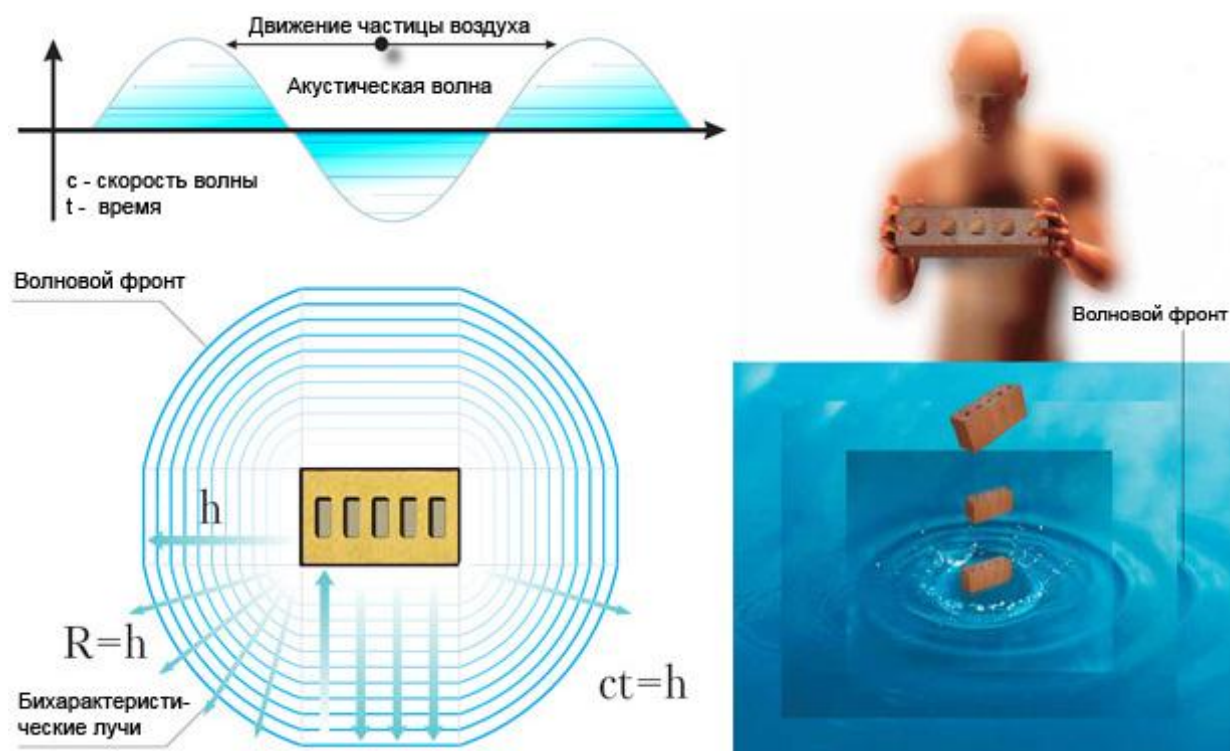
В нашем случае мы будем для удобства рассматривать звук как распространение неких частиц вдоль лучей или волн.



Затухание волн

Затухание волн по амплитуде в свободном пространстве происходит по двум причинам. Во-первых, из-за поглощения энергии волны средой, диссипации или поглощения энергии за счет вязкого трения.

В этом случае акустическая энергия переходит в тепловую и могут образовываться акустические течения. Во-вторых, из-за уменьшения амплитуды волны при удалении от источника за счет увеличения ее пространственного фронта. В этом случае акустическая энергия в целом сохраняется, но распределена по пространству. Уменьшение амплитуды пропорционально длине или площади волнового фронта.



Понятие волнового фронта используется в известном анекдоте о человеке, который побросал в воду все купленные им кирпичи. Когда его спросили, зачем он это сделал, человек ответил, что не мог понять, почему кирпичи прямоугольные, а волны от них — круглые. Из рисунка видно, что волны, конечно же, не круглые (слева: волновой фронт от кирпича, брошенного в воду)

Как правило, этот вид затухания является основным. Поэтому для увеличения дальности слышимого звука необходимы волноводы — естественные или искусственные, которые локализуют энергию звуковых волн в требуемом направлении. Примером таких систем являются переговорные трубы на кораблях.

Зоны слышимости и тени — бильярд как модель



Понятно, что на пути акустических волн обычно встречаются разные препятствия. Для твердых поверхностей справедливо утверждение — локальный угол падения волны равен локальному углу отражения. Для описания отражения звуковых волн от стенок обычного здания, без специальных покрытий, этого вполне достаточно. Так как движение частиц воздуха происходит вдоль направления распространения акустической волны — вдоль лучей, то можно считать, что угол падения равен углу отражения луча.

Для описания отражения звуковых волн от стенок обычного, без специальных покрытий, здания этого вполне достаточно. Как при этом будет воспринимать акустические волны человеческое ухо?



В общем случае, для произвольных стенок бильярда, описание зоны тени является достаточно трудной задачей. Для некоторых случаев зону тени можно достаточно просто описать.

Чтобы понять, что такое зона слышимости и зона тени звукового луча в помещении, удобно использовать методы, которые были разработаны для «математического» бильярда. Этот воображаемый бильярд не имеет луз, стенки его совпадают с периметром, а поле бильярдного стола — с полом помещения.

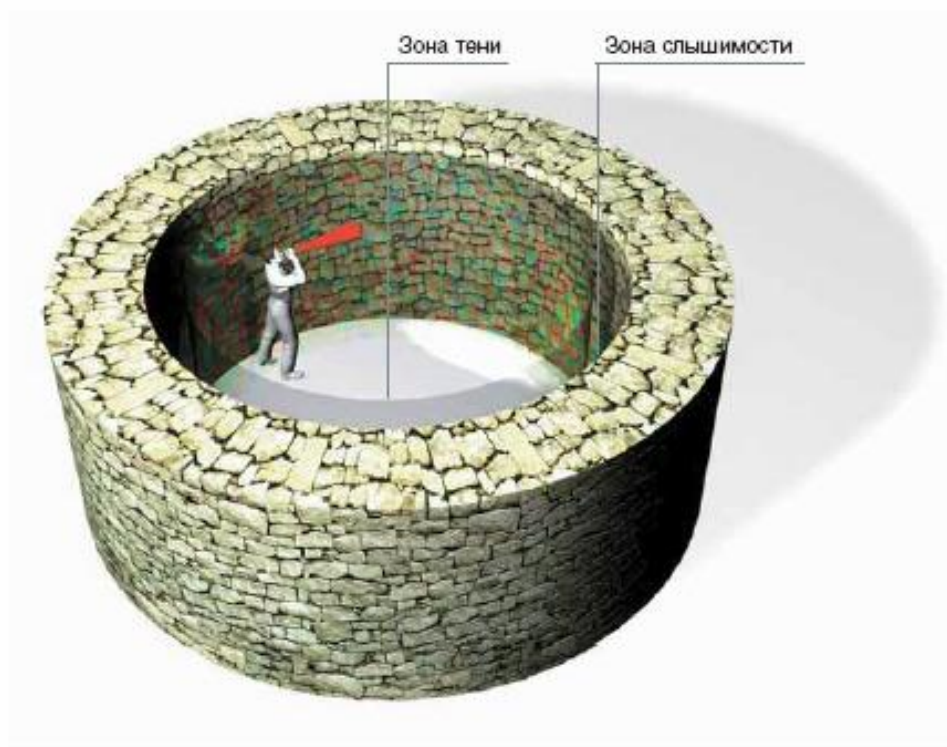
В этом случае можно утверждать, что зона слышимости будет находиться в окрестности множества точек всех возможных положений бильярдного шара, выпущенного в

направлении распространения звукового луча. Зона тени описывается как все поле бильярда, за исключением зоны слышимости.

Так, в круглом бильярде шар всегда движется по хорде, соединяющей две последовательные точки отражения от стенок. Так как угол падения равен углу отражения, то и все хорды, соединяющие две последовательные точки отражения шара, равны по длине. Зона возможных положений бильярдного шара в окружности находится в кольце между стенкой бильярда и окружностью, которой касается траектория бильярдного шара.

Фокус с цилиндром

Частотные характеристики человеческой речи находятся в диапазоне от нескольких сотен до полутора тысяч колебаний в секунду (герц). Частотный анализ спектра речи человека показывает, что частоты шепота выше частот обычной речи. Поэтому для описания распространения звуковых волн шепота методы геометрической акустики применимы лучше, чем для описания обычной речи.



Если человек находится около стены с круговым основанием и шепчет в направлении *вдоль* стены, то можно считать, что он шепчет в направлении некоторого луча. Шепот человека около стены является направленным, поэтому можно считать, что зона слышимости шепота находится в кольцевом цилиндре. Этот цилиндр с одной стороны ограничен стеной, с другой — цилиндром с направляющей окружностью, концентрической с основанием здания и касающейся самой длинной хорды луча, в котором находятся звуки шепота. Шепот будет слышен только теми, кто находится непосредственно в кольцевом цилиндре. В зоне же звуковой тени шепот не будет слышен вовсе. Это и есть эффект шепчущей галереи.

В трехмерном пространстве

Пол у любого помещения есть всегда, а вот потолок может быть, а может и не быть. Давайте рассмотрим некоторые варианты, возможные при переходе с двумерной плоскости математического бильярда в реальный трехмерный мир.

Потолка нет. В этом случае пол будет играть роль своеобразного зеркала. Можно считать, что в этом случае с вами будут шептаться два зеркально отраженных относительно пола человека. В слое слышимости затухание звука будет обратно пропорционально расстоянию между источником звука и слушателем.

В свободном пространстве затухание звука обратно пропорционально квадрату расстояния между источником и целью.

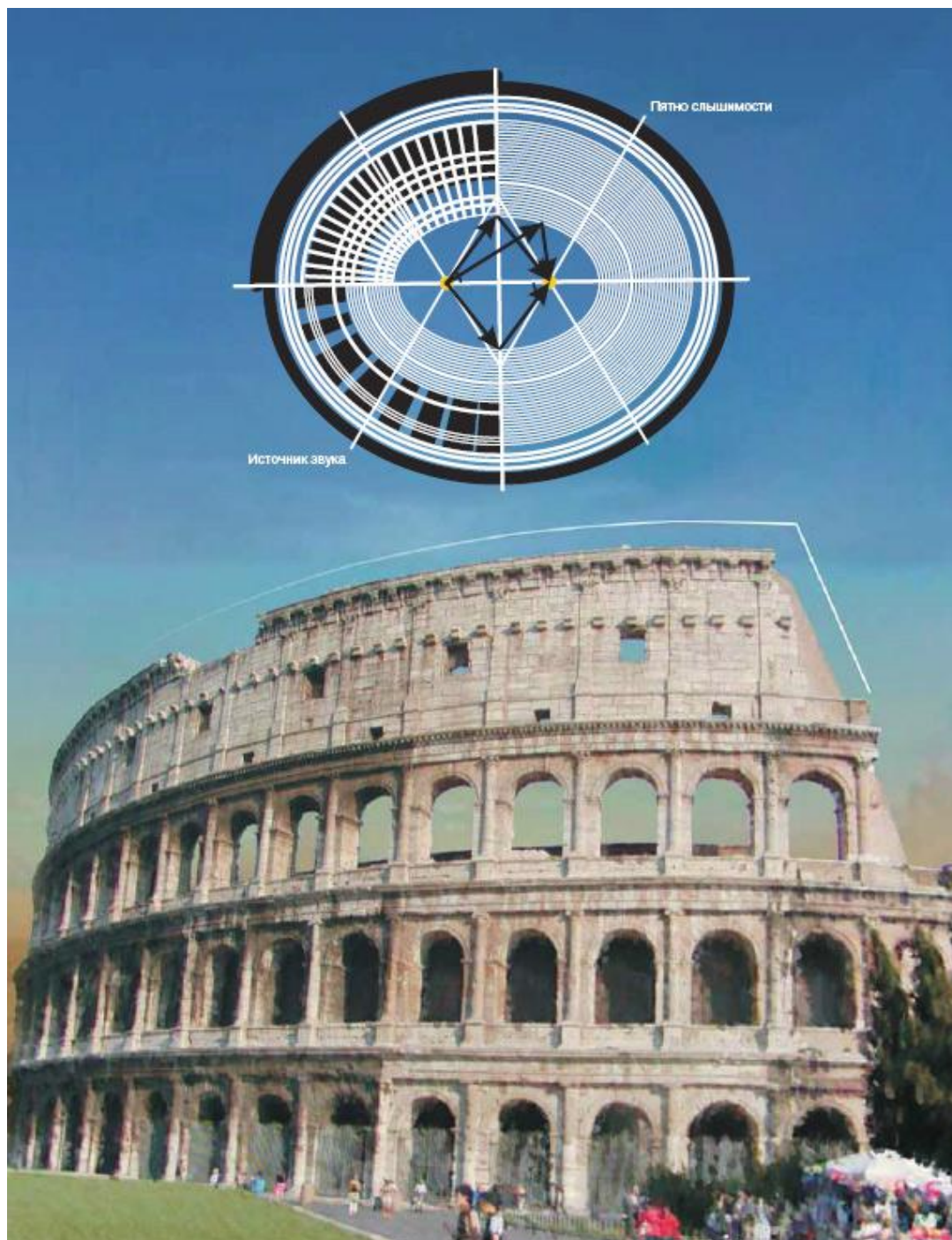
Есть потолок, параллельный полу. В этом случае потолок и пол будут играть роль двух зеркал. С вами будут перешептываться бесконечное число людей, зеркально отраженных относительно пола и потолка. Затухания звука происходить не будет.



Есть потолок или стены эллипсоидальной формы. Для полноты описания простых и незаметных способов пошептаться необходимо отметить замечательные свойства эллипсоида. Если источник звука находится в одном из его фокусов, то максимальная слышимость будет в другом фокусе. Поэтому если крыша здания или его стены имеют эллипсоидальную форму, то вне зависимости от остальной архитектуры здания два человека, находящиеся в фокусах эллипсоида, могут прекрасно пошептаться, не обращая внимания на окружающих. Наличие подобного «пятна» максимальной слышимости — основное отличие эллипсоидальных галерей от круговых. В последних есть просто область слышимости.

Станьте чудотворцем

Если у читателя после прочтения этой заметки появится желание построить собственное шепчущее строение, мы могли бы порекомендовать ему выбрать в качестве его основания эллипс. Такая форма хороша тем, что можно поболтать с находящимся во втором фокусе гостем, не открывая своего инкогнито и совершенно без посторонних ушей.



Созданное Вами строение, возможно, войдет в ряд мировых достопримечательностей, таких как стена шепота в Китае, собор святого Петра в Риме, скульптурный зал Капитолия, комната у входа в бар в нижнем этаже Центрального вокзала в Нью-Йорке.