

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА *)**В. Вэли**

Большие интерферометры, работающие на лазерном пучке, позволяют улавливать малейшие возмущения грунта с беспрецедентной доныне чувствительностью. Длина одного из таких лазерных сейсмографов равна 1020 метрам.

Земная твердь непрерывно находится в движении. Наиболее очевидным и значительным образом это проявляется в землетрясениях, которые представляют собой серию толчков, обусловленных резкими перемещениями земной коры и мантии. Эти толчки состоят из серии волн давления и сдвига, которые сопровождаются рядом других смещений: рэлеевскими волнами (аналогичными волнам на воде) и волнами Лява (возникновением неровностей поверхности в направлении, перпендикулярном к направлению их распространения). Помимо всего этого, в течение дней или даже лет происходят также смещения другой природы, причем некоторые из них настолько незначительны и медленны, что их нельзя обнаружить с помощью обычных сейсмографов. К ним относятся микроземлетрясения с относительной амплитудой порядка нескольких десятиллиардных и с периодом в несколько секунд, а также приливы и отливы земной суши с относительной амплитудой в несколько стомиллионных и периодом около 12 часов. Регистрация и изучение этих колебаний дают много информации о структуре Земли и процессах, происходящих в ее недрах.

До недавнего времени самым тонким детектором колебаний земли был сейсмограф, разработанный в Калифорнийском технологическом институте покойным Хьюго Бенъёфом. Чувствительность этого сейсмографа настолько высока, что с его помощью удается регистрировать такие слабые колебания земной коры, относительная амплитуда которых порядка всего лишь одной миллиардной. Тем не менее в последние несколько лет пробудился большой интерес к еще более чувствительным сейсмографам. Этот интерес стимулировался отчасти тем, что изучение большей области сейсмических частот, возможно, дало бы информацию, которая позволила бы предсказывать землетрясения. Кроме того, можно надеяться, что использование сверхчувствительных счетчиков сделало бы осуществимой регистрацию гравитационных волн, предсказываемых общей теорией относительности.

Создание подобных приборов стало возможным благодаря развитию лазерной техники. Этим вопросом занимались сотрудники ряда институтов, включая моих коллег из BSRL **) и Вашингтонского университета и меня лично. Названные геофизическими лазерными сейсмографами ***)

*) Victor V a l i, Measuring Earth Strains by Laser, Scientific American 220 (6), 89 (1969). Перевод И. И. Ройзена.

**) BSRL — Boeing Scientific Research Laboratories.

***) В тексте: «Geophysical laser strain meters». (Прим. перев.)

эти устройства представляют собой, по существу, большие интерферометры, позволяющие измерять разность длин посредством наблюдения конструктивной и деструктивной интерференции световых волн. В принципе, с их помощью должны стать доступными измерения с точностью до порядка 10^{-15} . Некоторые из таких сейсмографов уже работают и обеспечивают в течение коротких интервалов времени точность 10^{-12} .

Ясно, что это — несомненный прогресс по сравнению с существовавшими ранее сейсмографами, подобными сейсмографу Беньёфа. Последний представляет собой длинный цилиндр из плавленого кварца, который устанавливается следующим образом. Один конец этого цилиндра закреплен в бедроке, а на другом имеется специальное устройство, которое непрерывно измеряет расстояние между ним и стойкой, также укрепленной в бедроке. Упомянутое устройство может, в частности, представлять собой электрическую цепь, связывающую обкладки конденсатора, одна из которых приделана к концу кварцевого цилиндра, а другая к стойке. Расстояние между обкладками, и, следовательно, емкость этого конденсатора, являющегося частью колебательного контура, изменяется в зависимости от горизонтальных колебаний бедрока, что регистрируется по изменению резонансной частоты соответствующего контура.

Этот прибор чувствителен к колебаниям температуры, давления и влажности, которые могут повлиять на длину цилиндра. Кроме того, из плавленого кварца трудно изготовить цилиндр длиной больше, чем 20—30 метров. Это обстоятельство ограничивает его точность, поскольку в бедроке, куда укрепляется сейсмограф, почти всегда имеются трещины, из-за чего локальные смещения могут маскировать как крупномасштабные, так и глобальные колебания Земли. Поэтому такой сейсмограф способен регистрировать истинные колебания значительных участков Земли, если только с помощью усреднения удастся их отделить от локальных смещений.

Около пяти лет назад мои коллеги Р. Крогштад, У. Вэли и я пришли к мысли, что можно избавиться от перечисленных ограничений, если для регистрации колебаний почвы использовать лазерный интерферометр. Успех этого мероприятия доказывается сконструированным Р. Бостромом и мной 1020-метровым прибором, который находится в заброшенном железнодорожном туннеле на глубине 500 метров от поверхности земли. Этот «сейсмограф» представляет собой, по существу, очень большой интерферометр типа Фабри — Перо. В этом интерферометре пучок красного света с длиной волны 6328 \AA от гелий-неонового лазера проходит сквозь алюминиевую трубу длиной 1020 метров. Прежде чем попасть в эту трубу, пучок проходит через частично отражающее зеркало, ориентированное под некоторым углом к нему, а затем через второе, тоже частично отражающее зеркало, на которое он падает нормально (рис. 1). Через наклонно расположенное зеркало проходит половина светового потока, существенная доля которого затем отражается от второго зеркала, и далее, отразившись от обратной стороны наклонного зеркала, направляется в детектор, ориентированный под прямым углом к основному пучку. Оставшаяся часть пучка проходит через трубу и отражается от третьего зеркала, расположенного на ее противоположном конце, назад по направлению ко второму зеркалу. Часть его проходит сквозь это зеркало и вместе со светом, сразу же отраженным от его противоположной стороны, направляется в детектор.

Два зеркала по концам трубы образуют резонатор, в котором световые волны, идущие в прямом и обратном направлениях, могут интерферировать между собой. В детекторе эта интерференция проявляется в виде

картины параллельных светлых и темных полос, первые из которых соответствуют конструктивной, а вторые — деструктивной интерференции. Упомянутые зеркала укреплены на гранитных глыбах, вделанных в бетон, и по мере того как колебания земли слегка изменяют расстояние между ними, смещается и положение интерференционных полос.

Устройство лазерных сейсмографов может основываться также на принципе интерферометра Майкельсона, у которого в отличие от интерферометра Фабри — Перо имеются два плеча, т. е. имеющийся вначале

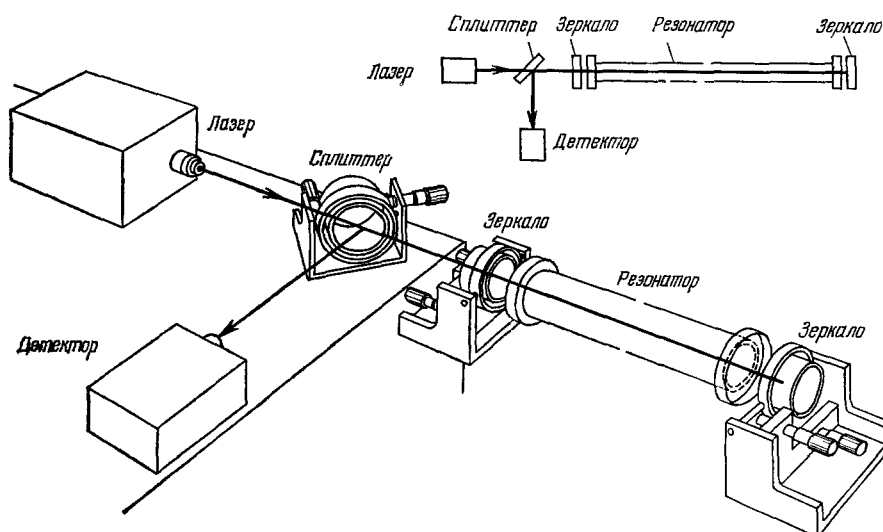


Рис. 1. Принципиальная схема лазерного сейсмографа. В его основу положен интерферометр Фабри — Перо. Лазер, расположенный слева, направляет пучок света на наклонно расположенный сплиттер. Часть пучка, прошедшая через него, падает на частично отражающее зеркало. Часть света отражается от него и поступает в детектор. Прошедшая это зеркало часть попадает в оптический резонатор и отражается от третьего зеркала, расположенного справа. В результате возникает интерференционная картина. Когда из-за сдвигов грунта расстояние между зеркалами изменяется, интерференционные полосы смещаются.

световой пучок расщепляется на два, которые затем интерферируют, пройдя предварительно с помощью системы зеркал в противоположном направлении одинаковый прямоугольный участок пути.

Преимущество лазерного сейсмографа связано в первую очередь с его большой длиной. В отличие от сейсмографа Беньёфа (рис. 2), который не может быть длиннее 20—30 метров, его длина практически неограничена, а потому и чувствительность может быть сделана очень высокой. Расхождение лазерного пучка чрезвычайно мало даже после отражения. Кроме того, когерентность световых волн в пучке не расстраивается даже после прохождения им огромных расстояний, т. е. фазы не сбиваются. Такой пучок может отражаться от зеркал, удаленных на почти любые земные расстояния, и возвращаться назад без серьезного уменьшения интенсивности или ухудшения когерентности. Поэтому интерференционная картина хорошо может формироваться даже на очень длинных оптических путях.

Как и сейсмограф Беньёфа, лазерный сейсмограф подвержен влиянию атмосферных условий. Изменения давления, температуры и конвекция приводят к возникновению турбулентности, которая может расстроить

лазерный пучок. Поэтому из использовавшейся нами 1020-метровой трубы откачивался воздух. Фактически весь свой путь свет проходит, находясь внутри этой трубы. Основные зеркала отделены от ее концов всего лишь миллиметровым воздушным зазором. На концах трубы находятся оптические окна. Они просветлены для того, чтобы свести отражения к минимуму. Будучи расположен глубоко под землей, наш прибор не подвержен влиянию случайных температурных возмущений, обусловленных ежедневным нагревом и охлаждением поверхности земли. Изучение подобных эффектов обычно не представляет особенного интереса.

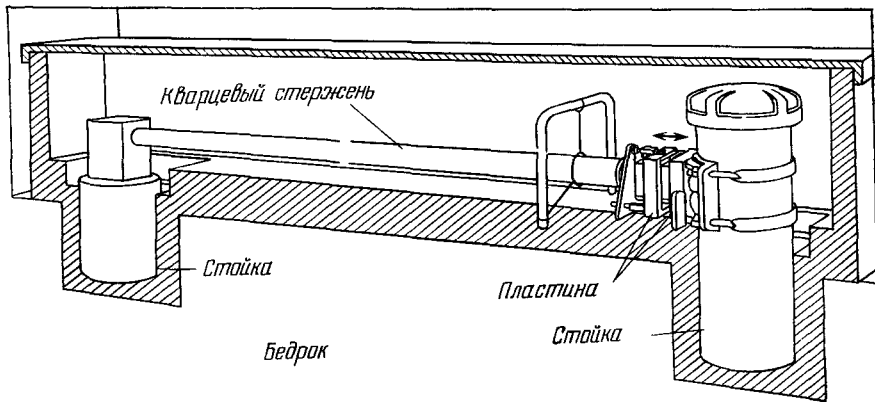


Рис. 2. Сейсмограф Бенъёфа — самый чувствительный сейсмограф нелазерного типа. С его помощью можно обнаружить продолжительные сдвиги, относительная амплитуда которых всего лишь 10^{-9} . В результате этих сдвигов изменяется расстояние между концом расположенного горизонтально кварцевого стержня и опорой справа. Пластины, прикрепленные к концу стержня и к этой опоре, образуют конденсатор, и изменение расстояния между ними сказывается на резонансной частоте контура. Колебания влажности, давления и температуры ограничивают точность этого прибора.

Наш прибор, равно как и ряд других лазерных сейсмографов, регистрирует колебания земли по смещению интерференционных полос. Для слежения за их движением этот сейсмограф оборудован специальным механизмом, устройством которого основано на обратной связи (подобно тому как спутники ориентируются по звездам). Этот механизм состоит из гальванометра, сопряженного с зеркалом. Последнее отражает свет, идущий от интерференционного максимума, направляя его в фотоумножитель, которым контролируется ток, проходящий через гальванометр. Когда интерференционный максимум смещается, световой поток, падающий на фотоумножитель, уменьшается, в результате чего ток, проходящий через гальванометр, возрастает и зеркало поворачивается таким образом, чтобы снова его минимизировать. Аналогичную роль может выполнять пьезоэлектрический кристалл или же привод высококачественного громкоговорителя.

Гальванометр может следить за движением интерференционных полос с точностью до 1% расстояния между ними. Поскольку расстояние между соседними полосами соответствует изменению разности хода на половину длины волны используемого в интерферометрах света, в случае нашего лазерного сейсмографа оно эквивалентно смещению приблизительно на 30 \AA , т. е. около пятнадцати атомных размеров. Уровень шумов в лазере настолько низок, что допускает измерения с точностью вплоть до 10^{-5} от расстояния между полосами. Такая точность открывает возможность

обнаружения колебаний земли с относительной амплитудой всего лишь порядка 10^{-15} . В обычном режиме наш 1020-метровый сейсмограф детектирует микроземлетрясения с минимальной относительной амплитудой около 10^{-10} , а в течение коротких интервалов времени его чувствительность достигает величины 10^{-12} .

Какие же возможности открывает описанная нами система? Она позволяет наблюдать микроземлетрясения. В результате этих наблюдений было установлено, что во время штормов в северной части Тихого океана амплитуда таких землетрясений возрастает в пять и более раз. Спектральное распределение интенсивности колебаний, полученное с помощью лазерного сейсмографа, обнаруживает четкий пик вблизи периода, равного семи секундам, который обусловлен отчасти микроземлетрясениями, отчасти резонансными колебаниями туннеля, в котором смонтирована система. Кроме того, имеется еще большой пик, соответствующий периоду в семь минут, который связан с минутными флуктуациями плотности атмосферы. Третья ярко выраженная точка спектра — это волны с периодом в 12 часов, соответствующие приливам и отливам.

Разумеется, необходимо уметь каким-то образом измерять величину смещения полос. Для того чтобы соответствующая следящая система могла измерять смещения, большие нескольких интервалов между интерференционными полосами, в ней имеется переключатель, который отключает следящий механизм, как только произойдет смещение на расстояние, превышающее интервал между соседними полосами. После этого происходит возврат в положение равновесия и система следит уже за следующим максимумом. В силу того, что при этом следящий механизм «перескакивает» интервал между двумя соседними полосами, в вычерчиваемой им кривой возникают разрывы, соответствующие смещению почвы, приводящему к изменению разности хода на половину длины волны. Это обеспечивает непрерывную и удобную калибровку системы. Направление смещения почвы определяется формой разрыва кривой.

С помощью такого считывающего устройства можно в принципе изучать любые сейсмические процессы. Скажем, если запись ведется на бумажной ленте, форма вычерчиваемой кривой отражает повороты зеркала, направленного на интерференционный максимум. Когда следящая система переключается на следующую полосу, самописец возвращается в свое исходное положение и начинает вычерчивать новую кривую. Если бы соответствующая система переключения отсутствовала, кривая, описывающая движение интерференционных полос, была бы непрерывной, поскольку самописец не мог бы возвращаться в равновесную точку. Такое устройство сделало бы записывающую систему крайне неудобной, поскольку для того, чтобы с помощью одной и той же системы регистрировать толчки с относительными амплитудами порядка 10^{-12} и прилив с амплитудой около $5 \cdot 10^{-8}$, потребовалась бы лента шириной в 20 метров. Аналогично обстоит дело и с магнитной лентой, которая может «вместить» только изменения величины сигнала в интервале примерно четырех порядков.

Существует еще и другая, столь же точная система измерения абсолютных величин смещения, обладающая тем преимуществом, что у нее отсутствует подвижная механическая часть. Эта система была предложена сотрудником Колорадского университета Дж. Л. Холлом. Она включает два лазера. Луч одного из них отражается от зеркала, установленных в бедре и образующих интерферометр Фабри — Перо. Поэтому частота выходящего света зависит от обусловленных земными толчками изменений расстояния между этими зеркалами. При наложении света от второго

лазера, частота которого поддерживается строго постоянной, на свет от первого возникают биения. Изменения их частоты пропорциональны смещениям грунта. Их можно измерить и записать.

Последнее существенное преимущество лазерного сейсмографа состоит в линейности его реакции на возмущение; частота колебаний земли не влияет на величину сигнала. Кроме того, у него нет никаких собственных механических резонансов, осложняющих интерпретацию результатов.

Достижения в этой области демонстрируются еще рядом интерферометров, одни из которых уже функционируют, а другие находятся в состоянии отладки. Одним из них является предшественник описанного выше — первый геофизический сейсмограф, предложенный Кругштадом, Моссом

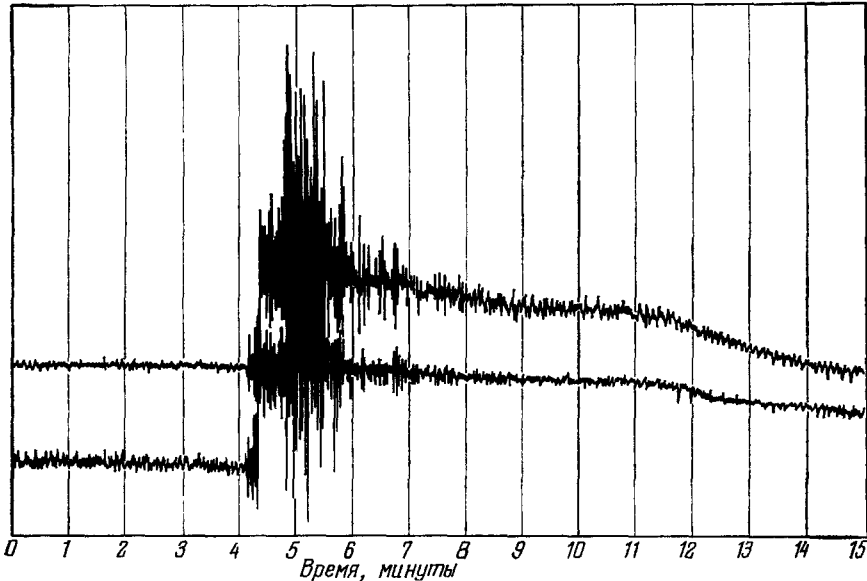


Рис. 3. Подземный ядерный взрыв в штате Невада, зарегистрированный лазерным интерферометром, расположенным в Калифорнии. Продолжительность возмущения более минуты. Поскольку соответствующий интерферометр имеет два плеча, на графике видны кривые, вычерченные двумя самописцами: верхняя — от 10-метрового, нижняя — от 25-метрового плеча.

и мной и построенный пять лет назад. Для определения достижимой с его помощью точности он работал вначале параллельно с принадлежащим Калифорнийскому технологическому институту сейсмографом Беньёфа. Затем он был модифицирован и помещен в один из заброшенных карьеров Калифорнии для минимизации тепловых помех и теперь с помощью разработанного Д. Слэйдом и мной монитора регистрирует движение стенок этого карьера. Он состоит из двух полостей типа Фабри — Перо, длина одной из которых равна десяти, а другой — двадцати метрам.

Обнаруженная с помощью этого прибора амплитуда приливов суши в этом районе приблизительно на порядок больше нормальной, что указывает на усиление сдвигов стенок карьера в поперечном направлении. Другой интересный результат состоит в наблюдении тонкой структуры этих сдвигов. Характерным является присутствие участка колебательных движений продолжительностью в несколько минут. Обычно по окончании этих колебаний почва возвращается в свое прежнее положение. Однако

иногда в результате обнаруживается остаточный сдвиг. Он мог бы быть обусловлен незначительными смещениями, происходящими на некотором расстоянии от места, где производится регистрация. По мере того как такое смещение уменьшается, интерферометр возвращается в прежнее положение.

Некоторые события, зарегистрированные здесь, обусловлены естественными землетрясениями, другие — подземными ядерными испытаниями в штате Невада. С помощью одного-единственного прибора — сейсмографа с двумя взаимно перпендикулярными плечами — удастся определить как положение, так и силу толчка (рис. 3). Расстояние определяется

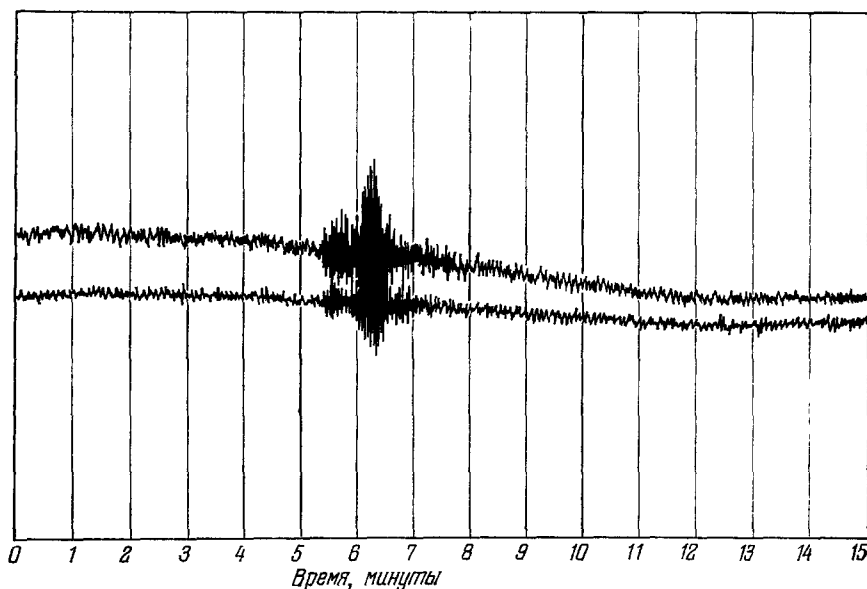


Рис. 4. Землетрясение в Калифорнии, зарегистрированное тем же сейсмографом, что и ядерный взрыв (см. рис. 3). Землетрясение порождает волны сдвига в большей степени, чем волны давления, в то время как энергия ядерного взрыва проявляется в основном в форме последних. Зарегистрированное землетрясение носило характер слабых вздрагиваний, длившихся всего около минуты и обладавших незначительной энергией.

по времени между приходом волн давления и волн сдвига, а направление — по относительной величине волн давления, действующих на каждое плечо интерферометра по отдельности. В то же время абсолютная амплитуда волн давления или сдвига дает информацию о силе толчка. Ядерные взрывы часто можно отличить от естественных землетрясений (ср. рис. 3 с рис. 4, 5 и 6) по относительной слабости сопутствующих им волн сдвига по сравнению с волнами давления.

Сотрудниками Калифорнийского университета Ловбергом и Дж. Бергером конструируется вблизи Сан-Диего 800-метровый сейсмограф, основанный на интерферометре Майкельсона. Его зеркала и считывающая система смонтированы на опорах, вкопанных в землю на глубину 10 футов, чем достигается минимизация тепловых помех. Небольшие пристройки защищают эти опоры от ветра и случайных нагревов солнцем. Длинная вакуумная труба, внутри которой проходят оптические пути, расположена над землей. Это требует хитроумной системы, компенсирующей тепловое расширение и сжатие, которое изменяет вплоть до нескольких дюймов воздушные зазоры между зеркалами интерферометра и трубы.

Один из вариантов сейсмографа, основанного на интерферометре Майкельсона, был разработан сотрудником Техасского университета

А. Гэнджи. Одно из плеч его интерферометра, длиной в один метр, вмонтировано в бедрок. Длина другого плеча регулируется специальным механизмом таким образом, чтобы равняться длине первого. В результате интерференционная картина поддерживается неизменной, а смещение грунта пропорционально напряжению, требуемому для соответствующего изменения длины второго плеча.

Холл, Дж. Фоллер и Р. Бендер (университет штата Колорадо) построили в заброшенной золотой копи тридцатиметровый интерферометр типа Фабри — Перо. Сейчас их прибор передельвается в сейсмограф, в котором регистрация смещений производится путем анализа биений (см. выше). Лазерный сейсмограф для измерения относительных смещений в двух различных направлениях сконструирован Х. Ван-Винном, Дж. Савино и Л. Олсоном — сотрудниками геологической обсерватории Колумбийского университета. Его устройство таково. Два лазера метровой длины

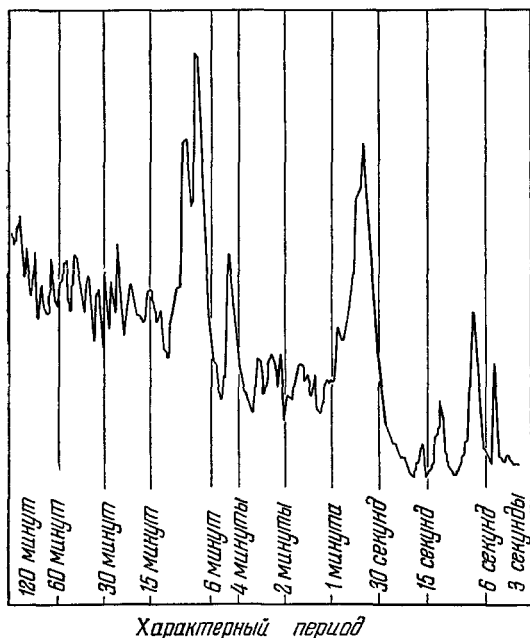


Рис. 5. Глобальный спектр мощности, зарегистрированный нашим сейсмографом на протяжении 6 дней — с 28 мая по 2 июня 1968 г. Справа виден ряд пиков, соответствующих микроземлетрясениям и резонансам туннеля с периодами от 3 до 12 секунд. Наивысшие всплески соответствуют минутным колебаниям давления в туннеле, отвечающим периодам его основных резонансов.

установлены под прямым углом друг относительно друга, а зеркала,

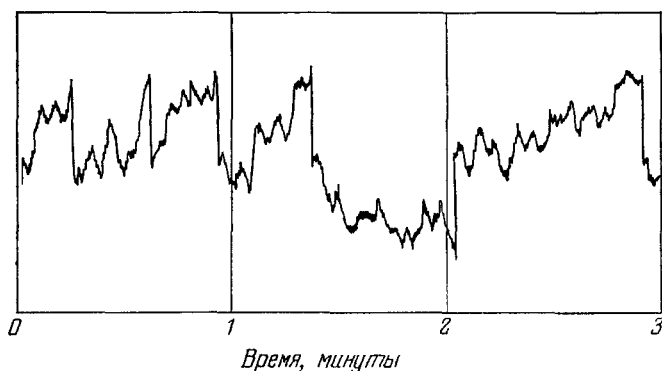


Рис. 6. Микроземлетрясения, зарегистрированные нашим сейсмографом, соответствующие относительным амплитудам сдвигов около 10^{-10} .

расположенные на их концах (и образующие резонатор), закреплены в бедрок. Частота биений, возникающих от наложения излучений этих

лазеров, определяет относительное смещение в соответствующих направлениях. Поскольку сами лазеры расположены внутри изучаемого участка, точность такой системы ограничена.

Единственной серьезной трудностью, с которой приходится иметь дело в любой из перечисленных систем, является нестабильность излучаемой лазером длины волны. Ее изменение может стать причиной ошибок, поскольку возникающий в результате этого сдвиг интерференционных полос или изменения частоты биений могут быть неотличимы от тех, которые обусловлены смещениями грунта. У специально изготовленных лазеров, защищенных от температурных и акустических воздействий, относительная нестабильность длины волны может быть сделана меньше, чем 10^{-10} в час. Этого, однако, недостаточно для осуществления высокочувствительных измерений, например, тех, которые необходимы для обнаружения гравитационных волн.

Для стабилизации частоты применяются два различных стабилизирующих устройства. Одно из них, разработанное Ловбергом и Бергером, представляет собой тридцатисантиметровый стержень из плавленного кварца, который хорошо защищен от акустических воздействий и помещается в объем с контролируемой температурой. Он играет роль резонатора в интерферометре Фабри — Перо, в который отводится часть излучаемого лазером света. Если частота света изменяется, то меняется и отклик этой системы. Таким образом осуществляется обратная связь с лазером, у которого под действием этого изменения может быть восстановлена первоначальная частота. Качество этой системы определяется качеством стандарта длины, формирующего стабилизирующий резонатор.

Холл и Р. Баргер стабилизировали свет лазера, использовавшийся в интерферометре Фабри — Перо, привязывая его длину волны к инфракрасной линии спектра метана на длине волны 3,39 мкм. Поскольку соответствующая частота определяется атомными постоянными, устраняется проблема обеспечения механической стабильности стандарта длины. Полуширина этой линии около 10^{-12} , что позволяет с ее помощью достичь соответствующей стабильности лазерного излучения.

Лазерные сейсмографы наряду с сейсмографами Беньёфа и другими приборами подобного типа могут сыграть существенную роль в деле выяснения причин землетрясений, таких, как, например, произошедшее в 1964 г. на Аляске. Существующее на сегодняшний день понимание их причин и инженерные возможности недостаточны для того, чтобы исключить случайные ошибки. Хотя и можно предсказать, где ожидается сильное землетрясение, не удастся достаточно точно оценить его силу, а также указать, когда оно будет происходить. Известно, однако, что там, где происходит землетрясение, вещество, из которого состоит мантия, не находится в застывшем состоянии, а должно начать с некоторой скоростью сползать перед тем, как произойдет перелом или же соскальзывание, порождающие землетрясение. В этой связи непрерывное наблюдение за смещениями грунта в местах высокой сейсмической активности могло бы оказаться очень полезным. Геофизическая группа службы геологических наблюдений США, возглавляемая В. Г. Пекорой, запросила правительство о финансовой поддержке десятилетней программы изучения возможностей предсказания землетрясений и принятия предупредительных мер. Предполагается, что эта программа должна включать организацию упомянутого постоянного наблюдения за движением грунта.

Связанным с этим и сравнительно недорогим инженерным приложением лазерных сейсмографов могло бы стать наблюдение за смещениями

искусственных сооружений, таких как плотины, большие здания и т. п. Таким путем можно было бы выяснить целый ряд вопросов, касающихся того, как влияют землетрясения на эти сооружения, их смещения, обусловленные смещениями грунта, и изменения в самой их структуре. Можно думать, что помещая в соответствующих местах сейсмографы и измеряя скорость сползания породы, удалось бы предсказывать обвалы в шахтах.

Эти приборы могли бы послужить также для получения информации, представляющей интерес и для других разделов геофизики. Так, например, имеются указания на то, что Северная и Южная Америка постепенно удаляются от Европы и Африки со скоростью нескольких сантиметров в год. Это движение зарождается в районе среднеатлантической впадины, большая часть которой проходит по дну океана. Однако часть ее выходит на поверхность, пересекая Исландию, и в этом месте можно было бы проследить за изменением ее ширины с помощью лазерного сейсмографа, определив тем самым скорость дрейфа материков. Другим интересным объектом применения лазерного сейсмографа для определения тонкой структуры смещений земной коры может стать Барбадосская гряда. Это место является зоной сжатия, в которой дно Атлантического океана движется относительно островов Карибского моря со скоростью нескольких миллиметров в год.

Можно было бы также построить лазерный сейсмограф для детектирования гравитационных волн, который регистрировал бы колебания Земли или Луны в целом как принимающих антенн. Согласно общей теории относительности, вращающаяся или же колеблющаяся масса, такая, как, скажем, двойная звезда, должна излучать гравитационные волны. Эти волны подобно электромагнитным поперечны, так что силы, с которыми они действуют на детектор, перпендикулярны к направлению их распространения. Они должны приводить к растяжениям и сжатиям, поэтому форма находящейся в их поле планеты должна слегка осциллировать. Эти осцилляции приведут к возникновению ничтожных смещений грунта, которые могли бы быть обнаружены с помощью ультрачувствительного сейсмографа.

В 1961 г. группа сотрудников Хьюзовских исследовательских лабораторий во главе с Р. Л. Форвардом предприняла попытку обнаружить межзвездное гравитационное излучение, используя Землю в качестве принимающей антенны. Измерения проводились вблизи озера Изабелла в Калифорнии в сейсмически спокойный период. Несмотря на благоприятные условия максимумов спектра вблизи частот собственных колебаний Земли не было обнаружено, хотя и ожидалось, что они должны быть, если форма планеты действительно осциллирует. Это означает только то, что в результате этого эксперимента удалось установить приблизительную верхнюю границу эффектов, обусловленных гравитационным излучением. Для продолжения поисков этих осцилляций с помощью лазерных сейсмографов желательно увеличить их длину и чувствительность.

Гравитационное излучение может быть обнаружено также по его специфическим поляризационным свойствам. Когда свет поляризован линейно, его взаимодействие с поляризационным фильтром повторяется после каждого поворота последнего на 180° . Согласно уравнениям Эйнштейна гравитационное излучение должно быть поляризовано таким образом, что для него то же самое происходит при каждом повороте фильтра на 90° . Таким образом, если бы Земля была принимающей антенной, то можно было бы ожидать, что через каждые шесть часов будет регистрироваться одинаковая поляризация. Другими словами, если направление гравитационного излучения фиксировано, его амплитуда,

а следовательно, и обусловленные им колебания должны были бы быть модулированы с шестичасовым периодом.

Одновременная регистрация гравитационного излучения по колебаниям Земли и Луны была бы убедительным доказательством его действительного существования. Так как между спектрами шумов на Земле и на

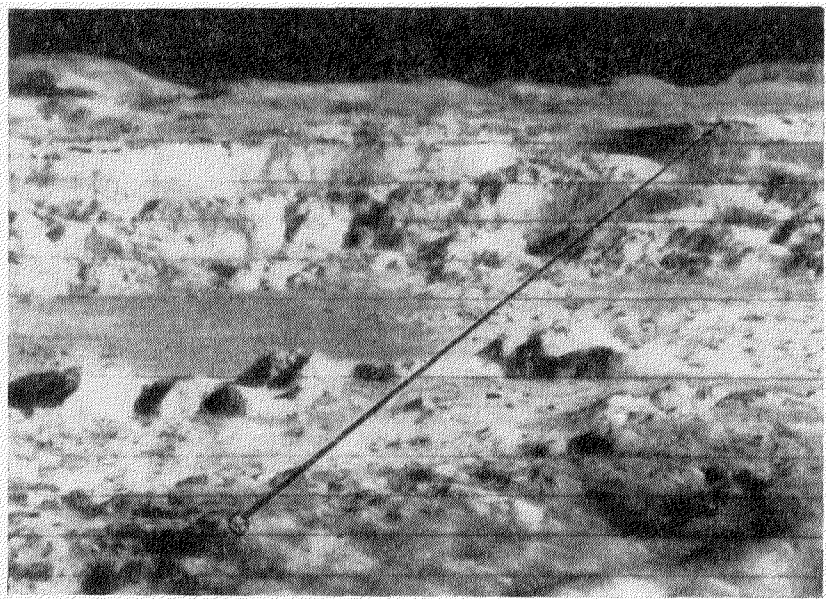


Рис. 7. Луна как антенна для приема гравитационных волн. Этого можно достичь установив в кратере Коперника лазерный стокилометровый сейсмограф. Поскольку гравитационные волны должны приводить к колебаниям формы Луны, по ней будут распространяться напряжения, которые могут детектироваться этим сейсмографом. Кратер Коперника удобен для установки такого прибора, так как между его краями существует непрерывный стокилометровый прямолинейный отрезок пути. В других местах кривизна лунной поверхности и ее неоднородности прерывали бы путь лазерного пучка. Линией на рисунке показан этот путь. На Луне не нужна вакуумная аппаратура. Для установки такого сейсмографа необходим лунный вездеход.

Луне корреляция отсутствует, их общие колебания (слегка сдвинутые по фазе) нельзя было бы отнести за счет каких-то неизвестных внутренних причин.

Поскольку на Луне нет атмосферы, для лунных измерений не нужны длинные вакуумные трубы. Одним из наиболее удобных мест на Луне для установки лазерного сейсмографа мог бы стать кратер Коперника (рис. 7). Его диаметр порядка 100 километров, а края настолько высоки, что выступают над горизонтом (см. рис. 7). Кроме того, это одно из тех мест, на которых в будущем могут прилуняться космические корабли.

Луна представляет собой очень хорошую антенну для приема гравитационных волн. Приливы лунной суши происходят с периодом около 27 дней, в отличие от Земли, где соответствующий период равен 12 часам. Оценки, основанные на сходстве структур Земли и Луны, давали для их амплитуды величину порядка двух метров или несколько более. Однако в последнее время выдвигаются все более убедительные соображения в пользу того, что эта оценка может оказаться очень сильно завышенной.

Исследования концентраций массы («масконов») в ряде районов Луны, проведенные сотрудником Манчестерского университета З. Копалом, показали, что жесткость Луны не менее чем в 1000 раз превышает ту, которая ожидалась. Это означает, что амплитуда лунных приливов меньше одного сантиметра. Тогда за приливной период диаметр кратера Коперника изменяется менее чем на 5 миллиметров, что соответствует сдвигу в интерферометре примерно на 2000 полос.

Согласно оценкам Копала поддающиеся регистрации лунотрясения, вызванные падением метеоритов, происходят в среднем реже, чем один раз в столетие. Во всяком случае, сравнительно небольшие метеориты не порождают на Луне сейсмических волн, так как их энергия диссипирует в реголите — гранулированной породе, из которой состоит поверхностный слой. Предварительные результаты, полученные с помощью сейсмографа, доставленного на Луну «Аполлоном-11», подтверждают, что Луна является в высшей степени спокойным телом.

Период основной моды собственных колебаний Луны порядка 15 минут, т. е. в 3000 раз короче, чем период лунных приливов, так что различать эти колебания и лунные приливы должно быть нетрудно, даже если отношение соответствующих амплитуд окажется порядка всего лишь 10^{-5} . Изучение колебаний Луны должно представлять интерес и само по себе, независимо от того, обусловлены ли они падением метеорита, лунотрясением или же гравитационными волнами. Точное определение их частоты и характера затухания могло бы дать богатую информацию о строении недр Луны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Encyclopedia of Physics: Geophysics II, v. XLVIII, Sec. 11, ed. S. Flügge, Springer-Verlag, 1957.
 2. V. Vali, R. S. Krogstad, W. Vali, Proc. IEEE 52, 857 (1964).
 3. V. Vali, R. C. Bostrom, Rev. Sci. Instrum. 39, 1304 (1968).
-