

## НАУЧНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ МЕТРОЛОГИИ СЕЙСМОМЕТРИИ

Захарченко Н.З.

*Геофизическая служба РАН, Обнинск, zakharchenko@gsras.ru*

Геофизика изучает естественные (геологические) объекты *in situ*, т. е. путем измерения геофизических полей, создаваемых этими объектами в естественных условиях. С точки зрения общей теории измерений геофизические измерения относятся к косвенным и совокупным. Это означает, что конечный результат измерений получают не непосредственно при регистрации геофизических полей, а лишь после обработки и интерпретации результатов наблюдений.

Геофизика как наука об измерениях объектов естественной (геологической) среды отличается от физики, изучающей объекты, доступные только количественным измерениям, тем, что включает в себя не только количественные измерения, но и сравнительные и классификационные. Это связано с тем, что при геофизических измерениях часто может отсутствовать основной атрибут количественных измерений – модель погрешности. [1]

В соответствии с буквой закона о Единстве измерений под измерением физической величины понимают совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины. Причем по окончании измерения необходимо получить не только значение физической величины, но и оценить точность результата измерения.

В литературе [2] можно найти мнения специалистов, что, следуя определениям и сути Закона о единстве измерений, измерения в области сейсмологии нельзя назвать измерениями (точнее количественными измерениями) по следующим причинам:

- Не создан физико-математический аппарат, описывающий измерения в области параметров поля упругих колебаний, а соответственно отсутствует основной атрибут количественных измерений – модель погрешности.

- Базисные параметры поля упругих колебаний - это аргументы волнового уравнения, которое является главным инструментом изучения этого поля. Это величина смещения колеблющихся в волне частиц, а также скорость и ускорение их движения, а также величина механического напряжения в упругой волне. И, строго говоря, на сегодняшний день ни одна из этих субстанций не имеет своего эталона, и, соответственно, измерена быть не может [2].

**Объект измерения.** Очаг землетрясения - область в литосфере, где происходит быстрое перемещение масс вдоль образующегося или развивающегося тектонического разрыва, возникают упругие колебания, и происходит высвобождение накопленной энергии. Формальное описание источника землетрясения может быть дано в следующем виде:

- Очаг тектонического землетрясения представляет собой разрыв сплошности материала Земли по некоторой плоской площадке;

- Разрыв возникает под действием упругих сдвиговых напряжений, накопленных в процессе тектонической деформации, и приводит к полному или частичному снятию этих напряжений на площадке разрыва;

- Разрыв возникает сначала в малой области, а затем распространяется от нее со скоростью, не превосходящей скорости продольных волн;

- Материал Земли вне поверхности разрыва остается линейно упругим.

Параметры очага каждого землетрясения, с учетом вышеназванных процессов в нем никогда не повторяются и не могут привести к появлению термина «эталонное землетрясение».

Известно, что при землетрясении значительная доля энергии тратится на разогрев и разрушение пород в очаговой области, но какая доля энергии переходит при этом в энергию упругих волн, остается не вполне ясным до сих пор. Это приводит к тому, что даже искусственный источник, например, взрыв, также не может быть в настоящее время принят за эталон объекта измерений.

**Трасса распространения сейсмического сигнала.** Сейсмология имеет дело с упругими сейсмическими волнами, генерируемыми естественными и искусственными источниками в Земле. По характеру движения грунта при распространении сейсмических волн их подразделяют на продольные (P), поперечные (S) и поверхностные LR- волны Релея и LQ-волны Лява. Волны P и S также называют объемными волнами.

По временам пробега от источника до станции объемные и поверхностные волны подразделяют на *локальные*, которые распространяются в приповерхностном слое до расстояний порядка 200 км, *региональные*, распространяющихся в пределах земной коры в диапазоне расстояний 200-2000 км, и *телесеismicические*, проникающие глубоко в мантию и регистрируемые в диапазоне 2000-10000 км. При распространении в слоистой Земле, аналогично законам геометрической оптики, P и S –волны испытывают отражения и преломления на границах, разделяющих среду с разными скоростями сейсмических волн.

Возможность регистрировать колебания Земли, вызванные тем или иным внешним воздействием, будь то землетрясение, взрыв или падение метеорита, обусловлена способностью земной среды реагировать на эти воздействия как упругое тело. И если бы Земля являлась однородным и изотропным телом и отсутствовали бы шумовые колебания, тогда обнаружение и оценка параметров сейсмических событий не представляли бы больших затруднений. Однако в реальной слоистой земной среде, содержащей радиальные и латеральные неоднородности, по мере удаления от эпицентра сейсмические волны, вызываемые источником, искажаются и принимают вид очень сложной последовательности перекрывающихся сигналов, каждый из которых обычно сильно отличается от исходного, возбужденного источником, но, тем не менее, содержит информацию об источнике. Форма сигнала значительно изменяется с увеличением расстояния из-за фокусировки и “захватывания энергии” вследствие быстрых изменений свойств Земли с глубиной и из-за обычных процессов расхождения, поглощения и рассеяния энергии при ее распространении в среде. Эти факторы затрудняют точную локализацию события. Дополнительные затруднения, особенно в случае обнаружения слабых событий, связаны также с наличием в Земле шумовых колебаний, вызванных различными природными и техногенными причинами. Только при их надлежащем учете и создании адекватных моделей может достигаться удовлетворительная сходимость результатов, получаемых разными системами наблюдений.

**Модель трассы – годографы.** Обработка и интерпретация результатов наблюдений использует зависимость скорости распространения в Земле объемных волн P и S с учетом имеющих место на разных глубинах неоднородностей и непроходимой для S-волн внешней жидкой оболочки ядра. Эта зависимость определяется обычно в соответствии с широко используемой в настоящее время скоростной моделью Земли *iaspei91*. Модель уточняется и дополняется региональными поправками.

Таблицы времен пробега (годографы) основных объемных волн, соответствующие модели *iaspei91*, были вычислены по инициативе Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли [МАСФНЗ- International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior –IASPEI) на основе данных о временах пробега по выборке надежно обработанных объемных сейсмических волн и ядерных взрывов, содержащихся в бюллетене Международного сейсмологического центра (ISC) за период 1964-1987 гг. Сейсмический годограф является одной из составляющих зависимости между временем пробега сейсмических волн и эпицентральной расстоянием. Зависимость может быть выражена в табличном и графическом виде. Интерпретация сейсмограммы с точки зрения определения эпицентра (очага землетрясения) сводится к выделению времен вступления различных типов волн и сравнению полученного набора времен вступлений с теоретическими, определенными годографом. Таким образом, годограф позволяет установить момент прихода (вступления) различных сейсмических волн в пункт наблюдений, а соответственное время возникновения землетрясения и эпицентральное расстояние.

Для интерпретации слабых и близких землетрясений существуют региональные годографы, учитывающие местные особенности строения района. Т.е. также лишь после соответствующего уточнения региональных особенностей можно добиться сходимости результатов в определении параметров землетрясений.

Величины амплитуд и периодов колебаний позволяют судить об энергии землетрясений (магнитуде) и интенсивности колебания в пункте наблюдения (балльность).

**Измерения.** Масштаб сейсмического явления по записи сейсмических волн на некотором расстоянии от источника может быть оценен путем вычисления магнитуды M или энергии E. Магнитуда является относительной логарифмической величиной, сравнивающей, насколько сильнее по амплитуде записи исследуемое явление, чем некоторое стандартное.

Методы кинематической и динамической калибровки являются основным средством повышения точности определения местоположения сейсмического источника и его магнитуды. Как следствие сложной неоднородности скоростного строения и поглощения сейсмических волн, алгоритмы определения основных характеристик очага, разработанные для сферически

симметричной Земли в целом или ее больших регионов, требуют более полного учета условий распространения сейсмических волн от источника к сейсмической станции, введения кинематических и динамических поправок. Такой учет можно осуществить двумя путями: либо изучить строение среды распространения объемных и поверхностных волн, рассчитывать времена пробега, амплитудные и спектральные искажения регистрируемых сигналов по отношению к базовому, т.е. сильно схематизированному генерализованному разрезу, либо исследовать поправки по отношению к базовым разрезам экспериментально.

Главной задачей и движущей силой развития инструментальной сейсмометрии является достижение единства методов и средств измерения. Причем в сейсмометрии задача обеспечения единства измерений стоит не только и не столько в силу требования обеспечения соответствия национальным и международным стандартам, сколько в силу глобальности изучаемых процессов.

В общем случае для обеспечения единства измерения: договариваются и декларируют эталон измерения, разрабатывают и изготавливают эталон, разрабатывают и утверждают поверочную схему. Но существующие в области метрологии сейсмометрии законодательные акты фактически не соответствуют современному уровню развития сейсмометрии ни в методическом, ни в техническом аспектах.

Существующий государственный специальный эталон единиц длины, скорости и ускорения для сейсмометрии и ГОСТ 8.562-97 (Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений сейсмоперемещения, сейсмоскорости и сейсмоускорения в диапазоне частот 0,01-20Гц), *явившийся результатом работы нескольких десятилетий, усилий ряда коллективов ученых, соответствует техническому уровню сейсмометрии шестидесятых годов прошлого века и, в лучшем случае, обеспечивает калибровку некоторых короткопериодных датчиков и датчиков сильных движений, не обеспечивает задачи единства измерения ни для задач мониторинга Национальной сети, ни для мониторинга слабой сейсмичности, ни для задач контроля ядерных взрывов.*

Вопрос применения эталона для калибровки/поверки высокочувствительных широкополосных датчиков был обсужден на совещании российских производителей датчиков, происходившем в Геофизической службе РАН (февраль, 2006 г.). Хотя эталон и был утвержден в 1997 г., но электронные широкополосные сейсмометры, такие как SMG-3 (Guralp, Англия) или STS-1 и STS-2 (Страйкен, Швейцария) на основе утверждений авторов разработки вибростендов и поверочной схемы (ГОСТ 8.562-97) не могут полагаться этим эталоном. Более того, периодическая поверка, требующая демонтажа сейсмического оборудования, отправки в метрологические центры, не может в принципе рассматриваться как нормальный подход к этой важной проблеме. При этом поверка подвергается только преобразователь движения в электрический сигнал и не учитывается масса приведенных выше факторов, влияющих на временные и амплитудные параметры сигналов, возбуждаемых сейсмическим событием в данной точке измерения. Не учитываются также дополнительные факторы, определяемые процессом обработки и интерпретации зарегистрированных сигналов. Т.е. стандарт в сейсмометрии не распространяется на определение параметров очага сейсмического события в целом и следует искать другие пути метрологического обеспечения сейсмических наблюдений.

Такая или сходная ситуация сложилась и во многих других отраслях. Отставание метрологического обеспечения от уровня развития техники было одним из толчков появления Федерального Закона о техническом регулировании (27 декабря 2002 года N 184-ФЗ), основным принципом которого является *“соответствие технического регулирования уровню развития национальной экономики, развития материально-технической базы, а также уровню научно-технического развития”*.

В международной практике принятые в нашей стране процедуры метрологической аттестации с применением эталона не используются. Существуют и широко используются разные методы косвенной калибровки.

**Сейсмические методы контроля ядерных испытаний.** В силу сложившейся политической обстановки, активного развития ядерного оружия и почти сорокалетних переговоров по запрещению проведения ядерных испытаний, основным камнем преткновения являлся вопрос эффективности контроля, процесс создания метрологической базы сейсмических измерений, как основного средства контроля проведения подземных и подводных ядерных взрывов, приобрел большое значение в международном масштабе.

Сейсмические методы контроля ядерных испытаний – это сравнительно молодой и самостоятельный раздел сейсмологии, сформировавшийся в период активного развития ядерного

оружия и проведения подземных испытаний. В течение этих лет развитие экспериментальной и теоретической сейсмологии было самым существенным образом ориентировано на решение военно-прикладной задачи контроля ядерных взрывов. Именно задачи контроля диктовали направления создания приборов, сейсмических сетей и сейсмических групп (антенн), развития наблюдений, стимулировали развитие теории очага землетрясения и подземного ядерного взрыва, новые методы и алгоритмы обработки данных.

С одной стороны, все аспекты проблемы, связанные с ядерными взрывами – это вопросы, относящиеся к государственной тайне, и, так или иначе, публикация сведений в открытой печати запрещена. С другой стороны, решение проблемы единства средств и методов измерений невозможно без участия специалистов всех заинтересованных стран, и, в первую очередь, США, которые в свою очередь работают в условиях аналогичного или, возможно, более жесткого режима сохранения государственной тайны.

Постепенно в ходе переговоров с помощью совместных усилий дипломатов и технических экспертов выкристаллизовался облик международного режима контроля Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), состоящего из:

- международной системы мониторинга на основе четырех методов - сейсмического, инфразвукового, радионуклидного и гидроакустического;
- Международного центра данных (МЦД), который собирал бы всю информацию, обрабатывал ее и предоставлял всем государствам-участникам;
- механизма консультаций и разъяснений и мер укрепления доверия.

Международная система мониторинга (МСМ) является технической основой верификационного режима. Она включает 321 станцию четырех типов - сейсмические, радионуклидные, гидроакустические, инфразвуковые, - расположенные более чем в 90 странах мира, а также в Антарктиде.

Основной технологией МСМ является сеть сейсмических станций. Она состоит из 50 основных сейсмостанций и 120 вспомогательных, которые регистрируют сейсмические волны, возникающие в результате движения земной поверхности, в том числе из-за подземных ядерных испытаний. Основные сейсмостанции должны непрерывно передавать данные в МЦД в режиме, близком к реальному времени. Назначение вспомогательных сейсмостанций - уточнение данных, полученных станциями основной сети, в отношении места и характера зарегистрированного сомнительного явления. Вспомогательные станции были отобраны в основном из числа существующих в национальных или международных сейсмических сетях, для которых либо не требуется, либо нужна минимальная модернизация.

Российский сегмент механизма проверки ДВЗЯИ состоит из шести станций основной сети и 13 сейсмостанций вспомогательной сети, Национального центра данных (НЦД) в г. Дубна, а также российской независимой подсистемы связи, которая должна воедино связать объекты МСМ и НЦД России, обеспечить передачу данных в МЦД и получение данных и продуктов МЦД. В число сейсмостанций вспомогательной сети входят и станции, находящиеся в ведении Геофизической службы РАН.

**Правовые вопросы.** Договор (ДВЗЯИ) подписан РФ в Вене 24 сентября 1996 и ратифицирован РФ 30 июня 2000 г. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2005 г. № 537 “О функциях федеральных органов исполнительной власти и Российской академии наук по реализации договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний” гласит, что Российская академия наук обеспечивает:

- 1) подготовку и функционирование российских объектов МСМ, находящихся в ведении Российской академии наук;
- 2) регулярное представление в Минобороны РФ сейсмических данных в согласованном объеме и результатов их обработки, а также дополнительных данных по запросу;
- 3) участие в проведении анализа явлений, классифицируемых как ядерные взрывы, на основании информации, предоставляемой МСМ;
- 4) осуществление совместно с другими федеральными органами международного научно-технического сотрудничества по вопросам, связанным с Договором;
- 5) установление в случае необходимости прямых контактов с Организацией по Договору (Подготовительной комиссией);
- 6) разработку и реализацию в пределах своих полномочий мер по защите сведений, составляющих государственную тайну, при подготовке к вступлению в силу Договора и его реализации;

7) использование Геофизической службой РАН сейсмических данных Международного центра данных для мониторинга.

*Это официальное оформление факта использования упомянутых выше сейсмостанций вспомогательной сети, находящихся в ведении Геофизической службы РАН, в Национальной сети мониторинга.*

Пункт 4 Статьи 4 Федерального Закона о техническом регулировании гласит, что если международным договором Российской Федерации в сфере технического регулирования установлены иные правила, чем те, которые предусмотрены настоящим Федеральным законом, применяются правила международного договора, а в случаях, если из международного договора следует, что для его применения требуется издание внутригосударственного акта, применяются правила международного договора и принятое на его основе законодательство Российской Федерации.

Статья 3 Закона об обеспечении единства измерений (в ред. Федерального закона от 10.01.2003 N 15-ФЗ) гласит что, если международным договором Российской Федерации установлены иные правила, чем те, которые содержатся в законодательстве Российской Федерации, то применяются правила международного договора.

**Выводы.** Таким образом, наряду с практически полным отсутствием нормативных актов в области создания систем сейсмического мониторинга, возникло законное основание для использования определений, научного и технического подхода, методик и средств контроля разработанных и согласованных в рамках Договора ДВЗЯИ в сети сейсмических наблюдений страны. Принятая в МСМ система метрологического обеспечения сейсмического мониторинга фактически является нормой в нашей стране.

Система предусматривает следующее:

На станциях используется оборудование только проверенных и заслуживающих доверия производителей.

Тестирование производится путем сравнения с оборудованием, принятым за эталонное и установленным в специально созданных условиях с минимальным уровнем сейсмического шума (штат New Mexico, США) и с моделью низкого земного шума.

Тестированию в Sandia National Laboratories подлежат образцы нового или модернизированного оборудования.

Параметры оборудования на сейсмических станциях считаются соответствующими паспортным данным изготовителя.

Оборудование, используемое на станциях, должно иметь встроенные средства калибровки.

После ввода оборудования персоналом ответственным за работу оборудования производится его первичная калибровка.

Основным методом контроля работы станции является сходимость результатов обработки данных наблюдений.

В процессе эксплуатации калибровка производится после ремонта, после переустановки или изменения положения датчиков, при выявлении несходимости результатов обработки.

Сейсмические станции в сети наблюдений подлежат сертификации на соответствие техническим требованиям МСМ (см.выше).

Для широкого использования этой методики должны быть разработаны, утверждены и узаконены методические указания (ведомственный стандарт) на калибровку сейсмических измерений.

### **Список литературы**

1. Непомнящих И.А. О типах геофизических измерений геологических объектов. // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 2004. №5. С.36-41.
2. Гликман А.Г. Спектральная сейсморазведка - истоки и следствия, <http://www.newgeophys.spb.ru/ru/book2/>