

Д.ф.-м.н., директор СКО
Объединенного института физики
Земли им.О.Ю.Шмидта РАН
В.Б. Заалишвили

Международное сотрудничество. Оценка сейсмической опасности. Современные принципы сейсмического микрорайонирования

В.Б. Заалишвили

В первой половине XX столетия произошли разрушительные землетрясения в Сан-Франциско (1903), Мессине (1906), Японии (1923), СССР (1948) и других местах, характеризовавшиеся большими жертвами среди населения. Ряд других сильных землетрясений при минимальных жертвах сопровождался разрушением большого количества зданий, сооружений и систем жизнеобеспечения. Это привело к тому, что с начала двадцатого столетия, в условиях достаточно развитых экспериментальных подходов и разработки первых сейсмических станций, наблюдается активизация внимания исследователей к проблеме сейсмической опасности и ее последствий.

Землетрясение представляет собой одно из наиболее грозных явлений природы, часто влекущее за собой тяжелые социальные и экономические последствия, в первую очередь из-за своей внезапности. Поэтому большое число научных исследований характеризовалось стремлением к установлению устойчивых явлений, предшествующих землетрясениям. Это должно было позволить осуществить прогноз времени и места его проявления. Впервые реальный шанс решения проблемы появился в середине 50-х годов прошлого столетия. К этому времени ретроспективный анализ событий позволил установить ряд предвестников землетрясений, перспективных для решения практических задач. В последующие тридцать лет научные исследования по прогнозу землетрясений в большинстве ведущих стран мира (Японии, США, СССР и т.д.) стали приоритетными.

Большие усилия ученых и немалые инвестиции были вложены в разработку соответствующих прогностических алгоритмов. Это привело к определенным успехам. В то же время и сегодня реальные прогнозы, имеющие практическую ценность, представляют большую редкость. Прогноз землетрясений должен включать указания о месте, времени и интенсивности сейсмического толчка, притом с высокой степенью точности, или, по крайней мере, содержать оценку достоверности сделанного предсказания, так как в противном случае он может принести больше вреда, чем пользы.

В этой связи необходимо отметить успешный прогноз сильного землетрясения по результатам комплексных наблюдений за различными предвестниками, в том числе динамикой уровня воды в колодцах и скважинах, реализованный китайскими учеными в феврале 1975г. В результате указанного прогноза при сильном Хайченгском землетрясении ($M=7.3$), полностью разрушившем город, погибло всего несколько десятков человек. И даже эти минимальные потери были обусловлены тем, что погибшие, нарушив рекомендации муниципалитета в условиях задержки события на два дня, вернулись в здания из-за холодной погоды. Тогда казалось, что найдены надежные способы контроля сейсмической опасности и управления сейсмическим риском. Но уже в июле 1976г. в Китае произошло неожиданное для сейсмологов катастрофическое Тангшаньское 11-балльное землетрясение, которое унесло, по различным оценкам, жизни около 600 000 человек. Это был явный конец приоритета прогнозных исследова-

ний. Практически все страны постепенно свернули свои большие прогнозные проекты. В то же время необходимо отметить, что благодаря таким работам было получено много новой информации, и исследования были продолжены, но уже наряду с другими. Другими словами, землетрясение – многофакторный процесс, и ожидать упрощенных прогностических решений, очевидно, не приходится.

В 1966 г. в СССР произошло 9-балльное Ташкентское землетрясение. Важной особенностью его было то, что, как и при Тангшаньском землетрясении, очаг находился непосредственно под городом. И хотя при Ташкентском землетрясении погибло всего лишь 9 человек, большое число людей осталось без крова. В связи с этим необходимо отметить недавнее землетрясение в Тбилиси 25 апреля 2002г. Здесь неожиданно для сейсмологов гипоцентры форшока (11 апреля – с интенсивностью, превышающей 5 баллов) и главного толчка землетрясения (25 апреля 2002г.) проявились непосредственно под городом. И при этом землетрясении с интенсивностью, немного превышающей 6 баллов, также погибло 9 человек, но количество полностью разрушенных зданий было весьма мало и, практически, никто не погиб под их обломками.

Главная особенность Ташкентского землетрясения заключалась в поведении властных структур после землетрясения. Впервые город отстраивался после землетрясения в условиях относительной информационной открытости и активного участия всех республик бывшего СССР, принявшего форму массовой поддержки. Кроме того, вскоре после Ташкентского землетрясения были выпущены новые Строительные нормы и правила для строительства в сейсмически опасных районах СССР (СНиП-1969), явившиеся основой всех последующих норм СССР, России и большинства стран СНГ. Но самый главный итог заключался в принятии властями впервые того простого факта, что при сегодняшнем уровне знаний и неоднозначности самого события не менее перспективным, чем прогноз землетрясений, может быть превентивная подготовка к нему. Подготовка к землетрясению, в частности, включает правильный учет различного рода опасных факторов, адекватную оценку сейсмической опасности и проведение соответствующих антисейсмических мероприятий, способствующих снижению

воздействия на здания и сооружения. Это прежде всего означало повышение качества строительства зданий и сооружений в сейсмически опасных районах.

Для представления сейсмической опасности в пространстве в 1937 г. была составлена первая карта **общего (обзорного) сейсмического районирования (ОСР) СССР**, представляющая собой продукт разбиения территории на зоны с различной ожидаемой сейсмичностью в баллах, т.е. зонирование всей территории страны по уровню сейсмической опасности. Впоследствии по мере накопления нового сейсмогеологического материала карта ОСР время от времени пересматривалась. После Ташкентского землетрясения получила поддержку новая концепция оценки сейсмической опасности. В основе концепции лежали многолетние исследования целого ряда известных советских ученых. От парадигмы «сейсмического актуализма» («где было, там и будет») начинается переход к методике, представляющей оценку сейсмической опасности на основе выделения реальных и потенциальных очаговых зон, а затем расчета возможных сотрясений на поверхности. Именно по этой методике в 1978 г. была разработана очередная карта ОСР. Казалось бы, она являлась наиболее прогрессивной для того времени. В то же время, как показали последующие события, карта характеризовалась существенными погрешностями. В частности, ненадежность карты приводила к тому, что после каждого крупного землетрясения соответствующие области на карте ОСР-78 менялись в сторону увеличения. Современные исследования показали, что указанная карта ОСР-78 на самом деле не была общей, т.к. разрабатывалась отдельными республиками по различным методикам и на основе разрозненного сейсмологического материала. Кроме того, имело место упрощенное представление параметров сейсмического режима и сейсмического эффекта на земной поверхности и т.д. [15]. В настоящее время на основе принципиально нового методологического подхода разработаны вероятностные карты ОСР-97.

Карты ОСР являются мелкомасштабными (М 1:5 000 000 – 2 500 000) и используются для планирования развития всей страны и больших регионов. Поэтому на практике при оценке сейсмической опасности для конкретных населенных пунктов и отдельных объектов необходимо про-

ведение работ по **детальному сейсмическому районированию** (ДСР). При этом устанавливаются сейсмический потенциал конкретных активных разломов, эпицентрального расстояние, затухание сейсмической энергии и т.д. В отличие от ОСР сейсмическое воздействие оценивается в баллах и амплитудах ускорений (скоростей, смещений). Как правило, здесь так же, как и при составлении карт ОСР, использовался т.н. детерминистский подход. В настоящее время все чаще используется вероятностный подход. Существуют готовые компьютерные программы. Анализ результатов показывает, что оба подхода имеют свои достоинства и недостатки и, очевидно, на практике необходимо учитывать результаты обоих подходов. При ДСР используются более крупномасштабные карты (М 1:500 000 – 100 000). При ОСР и ДСР изучаются зоны ВОЗ (возможные очаги землетрясений), т.е. источники сейсмической опасности, а также локальные зависимости параметров сейсмических воздействий от расстояния и характеристик очага и среды.

На интенсивность проявления землетрясений значительное влияние оказывают т.н. грунтовые условия (инженерно-геологические, гидрогеологические и геоморфологические условия) застройки. Для такой оценки проводят работы по **сейсмическому микрорайонированию** (СМР) территорий. Карты СМР – наиболее крупномасштабные (М 1:50 000 – 5 000). При их составлении учитывают результаты ДСР, а сами карты СМР являются непосредственной основой для практического строительства. Именно после Ташкентского землетрясения было принято правительственное постановление о необходимости повсеместного проведения СМР для территорий столиц союзных и автономных республик, находящихся в зоне высокой сейсмической опасности. Работы по СМР предполагали проведение работ по ДСР и включали их. При этом результаты работ находились в тесной взаимосвязи.

В процессе проведения ДСР и СМР организуется сеть временных наблюдений на исследуемых территориях. Хотя использование аналоговых станций с не всегда стандартными параметрами сейсмоприемников заметно снижало эффективность таких наблюдений, тем не менее практические задачи решались. В настоящее время за рубежом на урбанизированных территориях с высокой сейсмической опасностью, как правило,

организуются сети сейсмических станций. Иногда такие наблюдения организуются в масштабе целой страны. Так, в Японии после неожиданно тяжелых последствий землетрясения в Кобе (1995г.) уже через год была создана сеть наблюдений из 1000 цифровых станций K-NET, распределенных практически равномерно по всей территории Японии.

В России, несмотря на большие материальные трудности, существующая сеть станций РАН в отличие от стран Южного Кавказа полностью сохранилась, развивается и неуклонно оснащается цифровой аппаратурой. Организованы центры сбора и обработки данных. Скорость передачи информации иногда превышает скорость подачи данных в аналогичных зарубежных службах развитых стран. В этом несомненная заслуга сейсмической службы РАН. В то же время внедрение современных информационных технологий без повсеместного использования цифровых станций проблематично.

К сожалению, сеть изначально организована неравномерно и большей частью расположена в регионах с высокой сейсмической активностью и, очевидно, на урбанизированных территориях. В настоящее время разворачиваются наблюдения на платформенной части России в зонах крупных геологических разломов, концентрации населения и промышленных объектов, в местах с техногенной природой сейсмичности [14]. Необходимо отметить, что плотность сейсмической сети в России чрезвычайно низкая. Так, например, в России плотность сейсмической сети в 25 раз меньше плотности сети в Германии, где сейсмичность гораздо ниже [14]. В то же время наличие полноценной наблюдательной сети сейсмических станций позволяет осуществлять наблюдения за текущей сейсмической обстановкой, т.е. вести непрерывный сейсмический мониторинг территории [14]. Это, в частности, может помочь в решении некоторых задач ДСР и СМР без развертывания специальной временной сети наблюдений.

После Ташкентского землетрясения 1966г. работы по СМР территорий крупных городов СССР на основе использования стандартных методов и способов весьма активно проводились почти в течение двадцати лет. Указанные работы проводились на основе использования составленных специально для целей СМР крупномас-

штабных карт инженерно-геологических, гидро-геологических и геоморфологических условий городских территорий. В настоящее время назрела настоятельная необходимость повторного проведения работ по СМР, и наличие таких карт позволит значительно снизить стоимость работ. В то же время при этом необходимо учитывать динамику грунтовых условий, т.е. уточнять возможные изменения в грунтах оснований, их физического состояния (например, т.н. подтопление территорий и т.д.).

В заключение необходимо отметить, что сейсмическое районирование представляет собой не что иное, как прогноз. Но при этом прогноз направлен исключительно не на время события, а на особенности его проявления и сейсмический потенциал, что позволяет ориентироваться на определенный уровень воздействия.

Землетрясение – многофакторный процесс, и отсюда – высокая неопределенность особенностей его проявления. С целью исключения заметной погрешности результатов при оценках сейсмической опасности необходимо использовать целый комплекс существующих методов и способов. В то же время каждая такая работа представляет собой научное исследование и предполагает использование современных научных принципов, а также их постоянное совершенствование и развитие.

В настоящее время часто отмечают повышение сейсмической активности в мире. Об этом, в частности, свидетельствуют землетрясения в Спитаке, Раче (Джаве), Измите, Тбилиси. Несмотря на то, что последнее событие явно выпадает из этого ряда вследствие малости выделенной энергии, но неожиданное проявление очага непосредственно под большим городом многого стоит.

Кавказ еще недавно рассматривался как регион с достаточно умеренным уровнем сейсмического воздействия, несмотря на то, что отдельные ученые на основе палеосейсмологических данных доказывали возможность весьма сильных землетрясений. Никак не повлиял на снижение возможного уровня воздействия, например, даже известный исторический факт неоднократного переноса древней столицы Армении (г.Двин разрушался несколько раз). Это обусловило неожиданность высоких магнитуд при Спитакском и Рачинском землетрясениях и повышение в насто-

ящее время повсеместно на Кавказе уровня интенсивности в пределах 1-2 баллов. Та же ситуация повторилась на Сахалине (Нефтегорск, 1995г.), где реальное событие превысило уровень ожидаемого землетрясения на 2-3 балла. С другой стороны, необходимо отметить, что здания, рассчитанные на 7 баллов, здесь не разрушились и не стали причиной гибели людей даже при указанном значительном превышении ожидаемого воздействия. В этом, бесспорно, заслуга строительных норм СССР.

Высокая неопределенность землетрясения как события, не только по времени наступления, но и по силе и особенностям, приводит к необходимости полноценного использования на практике современных методов и способов оценки сейсмической опасности. В связи с этим необходимо отметить, что повышение возможного максимального уровня сейсмического воздействия за определенный промежуток времени на Кавказе не изменило и не могло изменить сейсмостойкость уже построенных зданий. С другой стороны, социальные и экономические потери (их совокупность и есть сейсмический риск) могут быть заметно снижены. Для этого необходима разработка определенных мероприятий, стимулирующих повышение сейсмостойкости зданий и сооружений, а также организация системы оповещения и обучения населения поведению во время любого стихийного бедствия. Понятно, что правильная оценка возможной сейсмической опасности может значительно снизить сейсмический риск при проведении антисейсмических мероприятий. Урбанизированные территории при их развитии характеризуются увеличением сейсмического риска, и его уменьшение требует определенных мероприятий и хорошо организованного планирования. Адекватные оценки сейсмической опасности, в виде результатов СМР на основе ДСР, несомненно, являются важным элементом управления сейсмическим риском.

Повышение уровня сейсмической опасности на Кавказе привело к образованию на картах ОСР обширных зон с 9-балльной интенсивностью. На основе специальных геолого-геоморфологических исследований палеосейсмодислокаций древних землетрясений непосредственной проходкой горных выработок в последние годы разработана методика [13], позволяющая достигать большей конкретизации активных разломов, что значитель-

но сужает зоны высокой интенсивности на картах ДСР, составленных по данной технологии. Это позволит не расплывать бесполезно большие средства при проектировании застройки на обширных площадях, а вкладывать их с учетом карт СМР в проектирование более надежных зданий и сооружений вблизи конкретных сейсмических источников.

Региональная рабочая встреча ученых из Армении, Болгарии, Венгрии, Грузии, России, Румынии, США, Таджикистана, Турции, Узбекистана, Украины, состоявшаяся 24-28 октября 2002 г. в Цахкадзоре, при поддержке Фонда Сороса, показала значительные потенциальные возможности научного взаимодействия. Это, в частности, предполагает участие в международных проектах, организацию объединенных мониторинговых геофизических и сейсмических наблюдений и т.д.

В настоящее время в республике выполняется международный проект «Наука за мир» под эгидой НАТО (SfP 974320): «Сейсмический риск больших городов Кавказа. Способы управления риском» по адекватной оценке и снижению сейсмического риска Баку, Владикавказа, Еревана и Тбилиси. Это – первый проект такого рода на Кавказе. В проекте участвуют Институт прикладной математики и информатики РАН и РСО-А, Страсбургский институт физики Земли, Мадридский университет, аналогичные научные учреждения из Азербайджана, Армении, Грузии и Москвы. Благодаря финансовой поддержке проекта участники из стран Кавказа получают современную компьютерную технику, современные цифровые сейсморазведочные станции, сейсмографы и современные компьютерные программы. Молодые ученые будут стажироваться в ведущих научных центрах Европы. Это позволит применять современные технологии для оценок сейсмической опасности и сейсмического риска, что должно повысить надежность оценок, а проведение соответствующих мероприятий – смягчить последствия природных и техногенных катастроф в регионе.

Кроме того, Владикавказ включен в число 49 городов мира, которым под эгидой ЮНЕСКО оказывается информационная помощь по современным методам оценки сейсмической опасности. И это не пассивная роль. Ученые республики посредством кооперации с учеными из Гарвардского университета, Токийского технологическо-

го университета и участниками из других стран с помощью Интернетских форумов в процессе выполнения данного проекта вносят свой вполне определенный вклад в мировую сейсмологическую науку.

В республике создана и функционирует сеть из 8 сейсмических станций. Вскоре будет установлена еще одна широкополосная цифровая сейсмическая станция, разработанная в России.

В настоящее время рассматривается вопрос о разработке федерального и впоследствии международного проекта по изучению вулканического центра Казбек. Его целью является прогноз различных природных явлений, в том числе опасных. В научных проектах будут участвовать коллеги из центральных российских научных учреждений. Но при этом ученые из региональных научных центров РАН будут также активно участвовать в этих проектах. Особое внимание будет уделяться участию в проектах молодежи. И это не только рабочие места, но и, в некотором роде, эволюция общества в целом. Мониторинг различных природных событий, являясь частью системы безопасности страны, позволит смягчить проявления сейсмических и других природных и техногенных катастроф.

Во Владикавказе предполагается создание учебного научного центра (УНЦ) на базе Северо-Кавказского технологического университета (СКГТУ) и академических институтов, входящих во Владикавказский научный центр РАН и РСО-А под эгидой программы «Интеграция» и т.д. Это позволит создать естественные условия для активного участия молодежи в науке и значит – в будущем нашей республики. Все это предполагает повышение эффективности научных исследований и направленность их на потребности практики.

Ниже приведены результаты исследований в виде разработанных и апробированных на практике способов инструментального метода сейсмического микрорайонирования. Предложенный подход к организации структуры изложения типичен для уже ставших традиционными рекомендаций по сейсмическому микрорайонированию, автор попытался при этом вписать самым естественным образом новые способы в перечень существующих.

Сейсмическое микрорайонирование предполагает количественную оценку изменения

ожидаемой интенсивности грунтов типичных участков районированной территории, обусловленного отличием их инженерно-геологических, геоморфологических, гидрогеологических условий от аналогичных условий грунтов эталонного участка. Последние характеризуются определенной исходной или уточненной величиной сейсмической интенсивности, получаемой из карт региональной сейсмической опасности. В настоящее время известны инженерно-геологический, инструментальный и расчетный методы. Основным методом сейсмического микрорайонирования является инструментальный метод. Инженерно-геологический метод неточен, он часто используется лишь в качестве инженерно-геологической основы СМР, хотя его использование позволяет оперативно решать практические задачи. При определенных условиях использование расчетного метода может быть не просто полезным, но он может даже рассматриваться как основной метод (например, в условиях г.Ленинакана).

Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования основан на сопоставлении записей инструментальных наблюдений на участках с типичными грунтовыми условиями для исследуемой территории. При этом производятся инструментальные измерения в виде регистрации реакции грунтов на реальное или искусственное сейсмическое воздействие или измеряются определенные показатели грунтов.

В зависимости от вида источника возбуждения колебаний грунта и показателя сейсмических свойств грунта используются соответствующие научные подходы и принципы. В последние годы, на основе развития физических основ метода, в России разработан и используется в практических работах целый ряд новых способов инструментального метода сейсмического микрорайонирования.

1. Исследование сейсмических свойств грунтов с помощью землетрясений

Основным способом инструментального метода сейсмического микрорайонирования является способ одновременной регистрации какого-либо землетрясения на различных участках районированной территории. Это позволяет непосредственным измерением показателей движения грунтов (амплитудный уровень, спектры и т.д.)

оценивать приращение ожидаемой интенсивности на типичных участках территории, выделенных на основе данных инженерно-геологической разведки.

1.1. Сейсмическое микрорайонирование с помощью сильных землетрясений

Предполагается, что наблюдаемое поведение грунтов при некотором сильном сейсмическом воздействии адекватно проявлению их потенциальной сейсмической опасности при будущих сильных землетрясениях. В то же время каждое землетрясение характеризуется особенностями проявления сейсмического эффекта на определенной территории, обусловленными уникальной совокупностью соответствующих показателей (тип разлома, механизм очага, магнитуда, эпицентральное расстояние, особенности прохождения сейсмических волн к сейсмической станции и т.д.). Поэтому, на первый взгляд, складывается парадоксальная ситуация: наличие инструментальных записей сильного землетрясения не позволяет решать надежно задачу сейсмического микрорайонирования. Лишь при определенных условиях единичные инструментальные записи (Мексика, 1985) позволяют прогнозировать основную часть особенностей грунтовых движений (например, спектральный состав колебаний) при будущих землетрясениях. С другой стороны, использование записей ряда сильных землетрясений может значительно повысить обоснованность прогнозирования сейсмической опасности грунтов при сильных сейсмических воздействиях. Следует отметить, что такие данные, как правило, могут быть получены только в результате многолетних наблюдений.

В последние годы в мире проводятся специальные инструментальные наблюдения за землетрясениями (например, группы SMART-1 и SMART-2 на о.Тайвань). В Японии, весьма активном сейсмическом регионе мира, после землетрясения в Кобе (Япония, 1995г.), как уже отмечалось выше, создана уникальная система, состоящая из огромного числа современных цифровых станций (1000 станций) и равномерно охватывающая практически всю территорию страны. При этом делается попытка наиболее полного решения задачи прогнозирования сейсмической опасности в регионе. И задача сейсми-

ческого микрорайонирования – только часть ее.

Создание таких обширных систем в европейских странах с умеренной сейсмической активностью, хотя и представляет идеальный вид мониторинга, менее обосновано для не особенно богатых стран с точки зрения финансовой разумности и результатов практического выхода. В то же время необходимо постоянно совершенствовать и развивать существующие сети сейсмических станций. Особенно это необходимо на Кавказе, т.к. сейсмические станции, будучи оснащенными стандартной технологией, позволят решать важные задачи сотрудничества в виде межгосударственных, т.е. кавказских систем наблюдений.

1.2. Сейсмическое микрорайонирование с помощью слабых землетрясений

В связи с редкостью сильных землетрясений, как правило, оценки приращения балльности производят по записям слабых землетрясений, когда имеет место линейная зависимость между динамическим напряжением и деформацией грунтов.

Расчет приращения балльности с помощью слабых землетрясений производится с помощью формулы [9-11]:

$$\Delta I = 3,3 \lg A_i/A_0, \quad (1)$$

где A_i, A_0 – амплитуды колебаний исследуемых и эталонных грунтов.

Понятно, что результаты исследований будут малоприменимы для прогнозирования сильных грунтовых движений. С другой стороны, при оценке сейсмической опасности территории важна любая информация, хотя бы с методической точки зрения.

2. Сейсмическое микрорайонирование с помощью микросейсм

Приращения балльности при таких наблюдениях определяются на основе сопоставления максимальных амплитуд или амплитудного уровня природно-искусственных микроколебаний грунтов – т.н. микросейсм.

Расчет приращения балльности для сильного землетрясения по микросейсмам производят с помощью формулы [10-12]:

$$\Delta I = 2 \lg A_i/A_0, \quad (2)$$

где A_i, A_0 – максимальные амплитуды микроколебаний для исследуемых и эталонных грунтов.

Указанный способ в странах СНГ на практике традиционно используется только как вспомогательный.

3. Исследование сейсмических свойств грунтов с помощью искусственных источников

Для возбуждения колебаний грунтовой толщи с целью изучения особенностей ее реакции в отсутствие землетрясений широко используются различного рода искусственные воздействия.

3.1. Сейсмическое микрорайонирование с помощью взрывного воздействия

Производство мощных или даже умеренных взрывов на территории городов, населенных пунктов или вблизи ответственных сооружений связано с большими, часто непреодолимыми, препятствиями. В связи с этим способ взрывов для оценки сейсмической опасности в настоящее время практически не используется. Это привело к широкому применению невзрывных источников колебаний.

Расчет приращения балльности грунтов районированной территории при использовании взрывов производится с помощью формулы [10-12]:

$$\Delta I = 3,3 \lg A_i/A_0, \quad (3)$$

где A_i, A_0 – амплитуды колебаний исследуемых и эталонных грунтов.

3.2. Сейсмическое микрорайонирование с помощью невзрывного маломощного импульсного воздействия

В странах СНГ наибольшее распространение получило использование традиционных для сейсмической разведки маломощных импульсных источников. Такие источники используются исключительно с целью возбуждения упругих волн для определения скоростей распространения продольных и поперечных волн в грунтах различного вида (рис.2б).

а)



б)

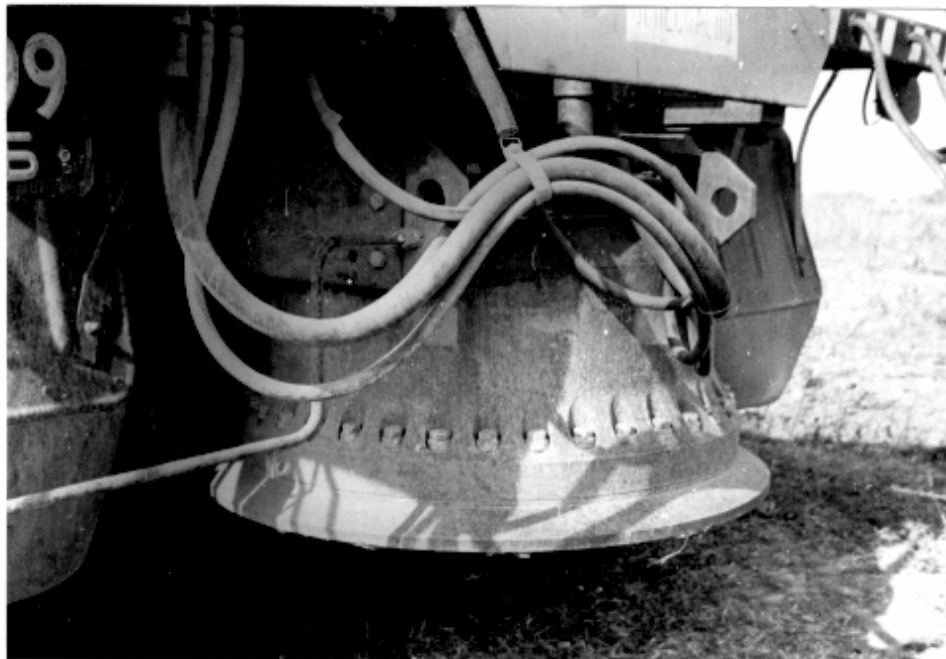


Рис. 1. Газодинамический импульсный источник СИ-32:
а) внешний вид источника; б) взрывная камера источника.

Сейсмическая опасность типичных участков исследуемой территории оценивается на основе использования способа сейсмических жесткостей или способа интенсивностей Медведова [6, 10-12]:

$$\Delta I = 1.67 \lg (p_0 V_0 / p_i V_i) , \quad (4)$$

где $p_0 V_0$ и $p_i V_i$ – произведение плотности грунта на скорость продольной (поперечной) волны - сей-

смические жесткости эталонного и исследуемого грунта соответственно.

Приращение балльности, обусловленное степенью обводненности грунтов, рассчитывается при этом по формуле:

$$\Delta I = K e^{-0.04h^2_{\text{ув}}} , \quad (5)$$

где: $K=1$ для глинистых и песчаных грунтов;
 $K=0.5$ для крупнообломочных грунтов с со-

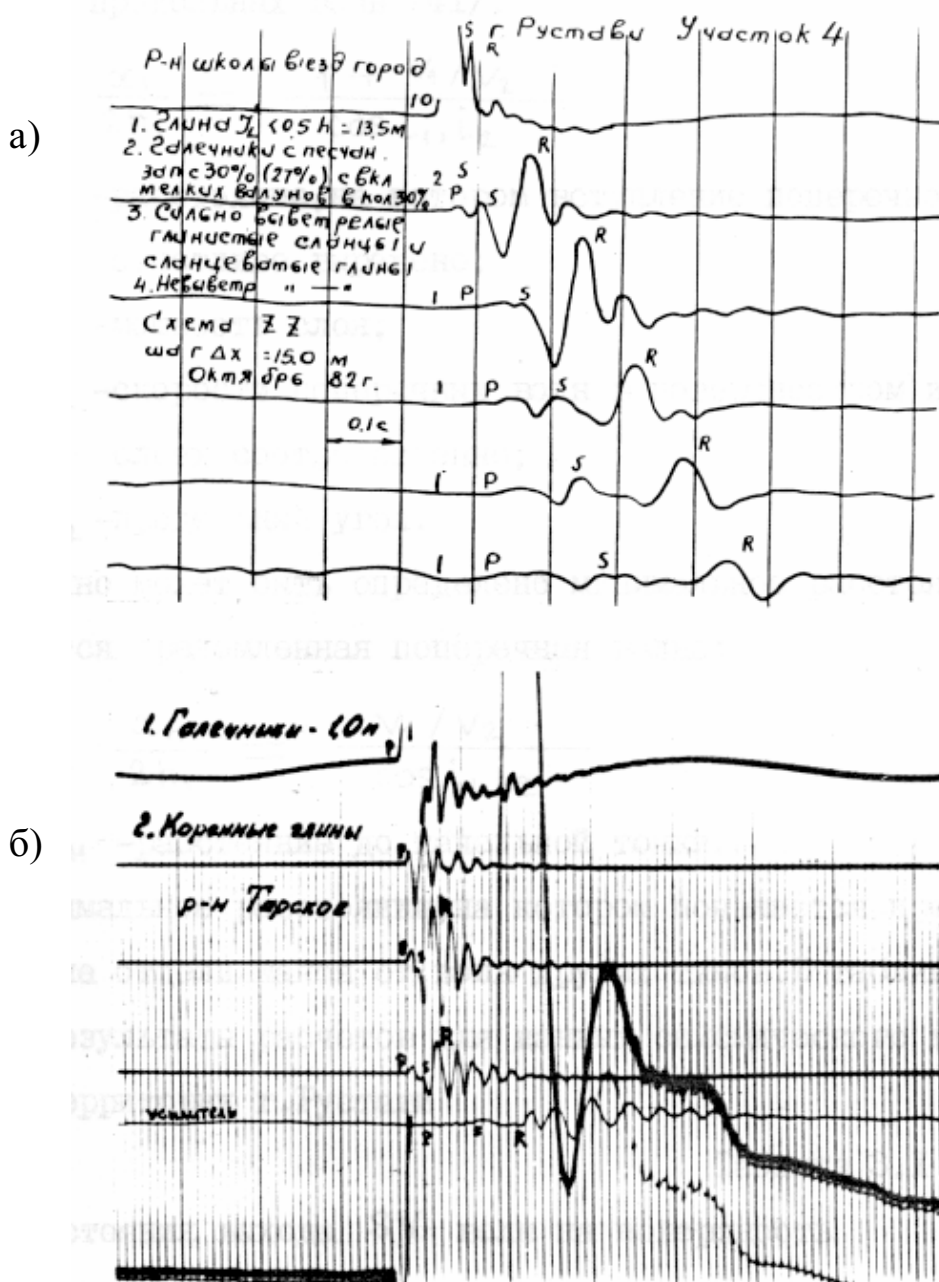


Рис.2. Сейсмограммы колебаний грунтовой толщи:
 а) возбужденные источником СИ-32; б) возбужденные ударом кувалды.

держанием песчано-глинистого заполнителя не менее 30% и сильно выветрелых скальных грунтов;

$K=0$ для плотных крупнообломочных грунтов из магматических пород с содержанием песчано-глинистого заполнителя до 30% и слабоветрелых скальных грунтов;

$h_{yзв}$ – уровень грунтовых вод.

Для оценки приращения балльности участка, сложенного обводненными грунтами, используют сумму результатов обоих расчетов.

3.3. Сейсмическое микрорайонирование с помощью невзрывного мощного импульсного воздействия

Простота и оперативность практического использования способа С.В. Медведева привели в 70-х годах к широкому распространению т.н. способа «интенсивностей» (страны СНГ и Восточной Европы, Италия, США, Индия, Чили и т.д.). В то же время результаты инженерного макро-

сейсмического обследования разрушительных землетрясений (например, в г. Скопле, Македония, 1964 и др.) показали, что способ не всегда надежен и его формальное использование может приводить к существенным погрешностям. В способе, в частности, отсутствует возможность учета «частотной избирательности грунтов».

Этот недостаток попытался устранить А.Б. Максимов, разработавший способ, в котором учитывались частотные особенности грунтов [7]:

$$\Delta I = 0,8 \lg (p_0 V_0 f_0^2 / p_i V_i f_i^2) , \quad (6)$$

где f_0, f_i – преобладающие частоты эталонного и исследуемого грунтов.

Способ большого распространения не нашел, т.к. частотные расхождения в колебаниях грунтов с резко различающимися прочностными свойствами при использовании маломощных источников, традиционных для сейсморазведки малых глубин, были незначительными, и результаты расчетов по формулам (4) и (6) практически не различались [2, 4, 7, 10-12, 14]. В то же время использование формулы (4) предполагало идентификацию поперечных волн, что в начале 70-х годов для исследователя создавало заметные и иногда непреодолимые сложности. Это привело к изъятию формулы А.Б. Максимова из рекомендаций по СМР, куда она ранее входила [11-12]. Другие попытки развития инструментального метода в виде развития способа жесткостей С.В. Медведева были малоуспешными или не находили широкого применения.

Специальными исследованиями позже было установлено, что достоверность результатов расчетов приращений балльности существенно повышается при использовании современных мощных импульсных источников (рис.1)[4]. На сейсмограммах уверенно выделяются основные типы сейсмических волн для глубин, соответствующих интересам инженерной сейсмологии (рис. 2а).

При этом приращение балльности определялось по следующей формуле [2]:

$$\Delta I = 0,8 \lg (p_0 V_0 f_{св0}^2 / p_i V_i f_{сви}^2) , \quad (7)$$

где $f_{св0}, f_{сви}$ – средневзвешенные частоты колебаний эталонного и исследуемого грунтов.

Средневзвешенная частота колебаний грунтов рассчитывалась при этом по следующей формуле [1,4]:

$$f_{св} = \sum A_i f_i / \sum A_i , \quad (8)$$

где $A_i f_i$ – амплитуда и соответствующая частота спектра колебаний.

С другой стороны, необходимость отдельного определения плотностей грунтов и скоростей распространения поперечных волн, неявно связанных с конечной задачей, носит несколько искусственный характер. Кроме того, при использовании импульсных источников отсутствует возможность управления спектральным составом возбужденных колебаний. Это привело к разработке способа сейсмического микрорайонирования с использованием мощных сейсмических вибраторов.

3.4. Сейсмическое микрорайонирование с помощью вибрационного воздействия

На основе специальных исследований записей сильных грунтовых движений были установлены, в частности, показатели движений грунта в виде площадей спектров колебаний, которые тесно связаны с поглощающими и сейсмическими свойствами грунтов и легко определяются по данным полевых измерений.

Отличительной особенностью способа является то, что он позволяет оценить сейсмическую опасность грунтов без каких-либо предварительных исследований, путем проведения непосредственных измерений реакции грунтовой толщи на стандартное вибрационное воздействие [1, 4].

Зависимость площади реального спектра колебаний плотных грунтов аналогична теоретической зависимости жесткости от частоты колебаний, а зависимость площади реального спектра колебаний рыхлых грунтов аналогична теоретической зависимости коэффициента потерь от частоты [8].

Другими словами, площадь реальных спектров колебаний плотных грунтов характеризует жесткость грунтов, а площадь реальных спектров колебаний рыхлых грунтов характеризует процесс потерь или поглощение сейсмической энергии грунтами (рис.3, 4).

При использовании вибрационного источника

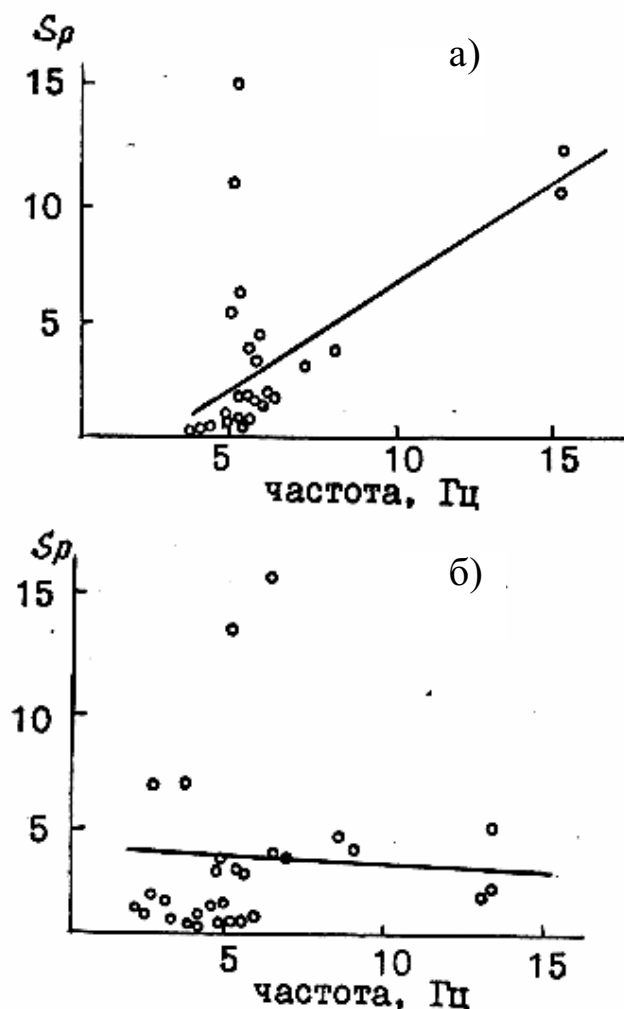


Рис. 3. Зависимость площади реального спектра от частоты колебаний:
а) для скальных грунтов;
б) для рыхлых грунтов.

(рис.5) расчет приращения балльности производится с помощью формулы [1, 4]:

$$\Delta I = 2 \lg S_i / S_0, \quad (9)$$

где S_i и S_0 – площади спектров колебаний исследуемых и эталонных грунтов.

Сейсмический вибратор позволяет создавать монохроматические колебания определенной частоты в грунтовой толще. Кроме того, имеется возможность введения в грунт т.н. свип-сигнала, когда генерируемая частота последовательно и равномерно меняется в пределах выбранных значений.

Позже с помощью специальных исследований была разработана аналогичная методика определения сейсмических свойств грунтов на ос-

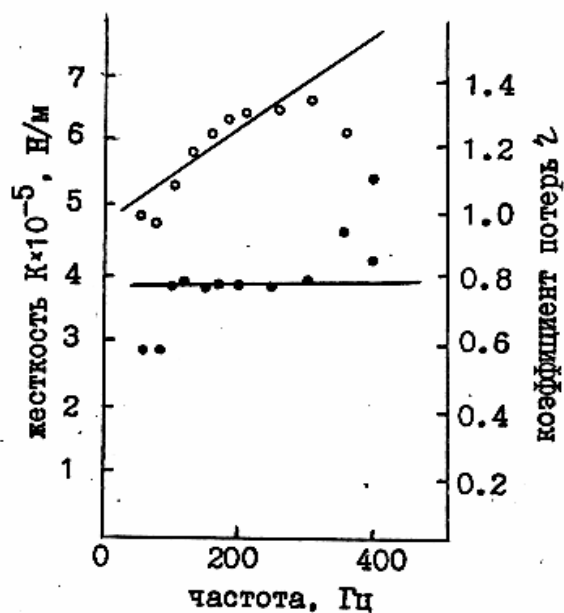


Рис. 4. Зависимости жесткости и коэффициента потерь материала от частоты колебаний [3].

нове непосредственных измерений невзрывного импульсного воздействия [1, 4, 16].

4. Сейсмическое микрорайонирование на основе учета нелинейных свойств грунтов

Традиционно используемые способы инструментального, основного, метода сейсмического микрорайонирования, за исключением данных анализа записей сильных землетрясений, дают представления лишь о линейно-упругих свойствах исследуемых грунтов.

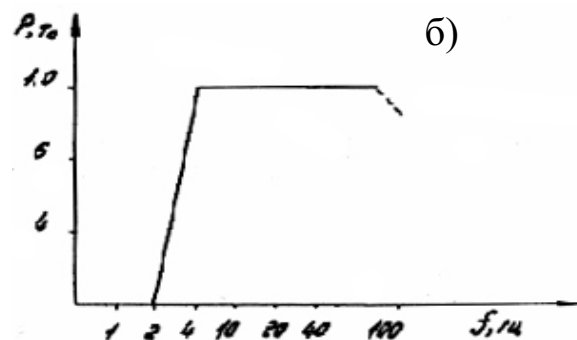
Установление корреляционных связей между линейно-упругими, нелинейно-упругими и упругопластическими деформациями грунтов различного литологического состава и степени обводнения позволит, при накоплении статистически достоверного экспериментального материала, создать надежную систему прогноза их поведения в реальных условиях сейсмического воздействия соответствующего уровня. Отсутствие достаточно надежных критериев оценки нелинейно-упругого и неупругого поведения грунтов приводит к необходимости развития и широкого использования подобных критериев при решении соответствующих практических задач [10].

Большие возможности имеются в центрах, имеющих соответствующим образом отлажен-



Рис.5. Вибрационный источник СВ-10/100

- а) внешний вид
 б) амплитудно-частотная характеристика источника



ные инструментальные записи сильных и разрушительных землетрясений, происшедших в различных частях мира. В то же время возможности эти не используются в полной мере. Этой парадоксальной ситуации способствует и некоторая закрытость данных, отсутствие прямых контактов между владельцем базы данных сильных грунтовых движений и потенциальным пользователем. В последние годы положение существенно меняется. Участие в международных проектах позволит в полной мере использовать данные банков сильных грунтовых движений для развития соответствующих областей знаний. В этой связи необходимо отметить, что нами разработана база данных сильных движений. Она включает почти 50 000 записей сильных землетрясений, причем для большинства из них име-

ются весьма качественные данные по грунтовым условиям в виде разрезов расположения сейсмических станций. Данные были получены благодаря любезной помощи японских, греческих и грузинских коллег.

В последние годы на основе использования последних достижений в России разработан ряд способов сейсмического микрорайонирования, в которых непосредственно учитываются нелинейно-упругие и неупругие свойства грунтов [1, 4]. На основе анализа баз данных сильных движений и выявления корреляционных соотношений были установлены новые эффективные и в то же время простые показатели, тесно связанные с поглощением и физической нелинейностью грунтов. В качестве одного из таких показателей, например, используется постоянная составляющая ко-

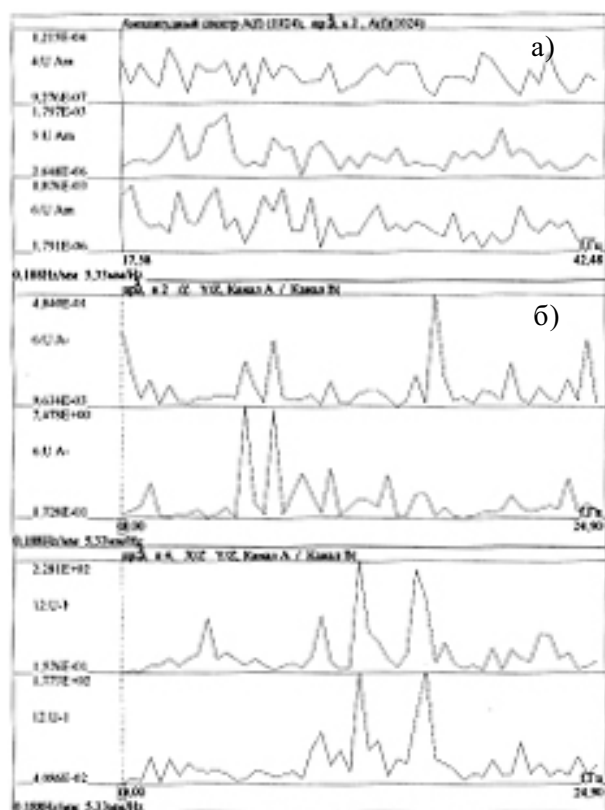


Рис.6. Микросейсмы
а) спектр колебаний (XYZ)
б) спектрограммы (XY/Z)

лебания, создаваемого т.н. радиационной силой при воздействии вибрационного грунта на поверхность грунта. Непосредственный учет физической нелинейности грунтов при сейсмическом микрорайонировании позволяет резко развить существующий уровень научных исследований и повысить обоснованность конечных результатов.

4.1 Сейсмическое микрорайонирование на основе учета нелинейно-упругих свойств грунтов

Пусть исходный, т.е. неискаженный нелинейными процессами, спектр имеет ярко выраженную резонансную форму (рис.7а). Сигнал, искаженный нелинейными явлениями, характеризуется приращением площади спектра (рис.7б) или расширением [4].

Ясно, что приращение Δf зависит от интенсивности сейсмических волн тем больше, чем больше интенсивность воздействия. Для реализации возможности сопоставления данных может быть использован стандартный сейсмический источ-

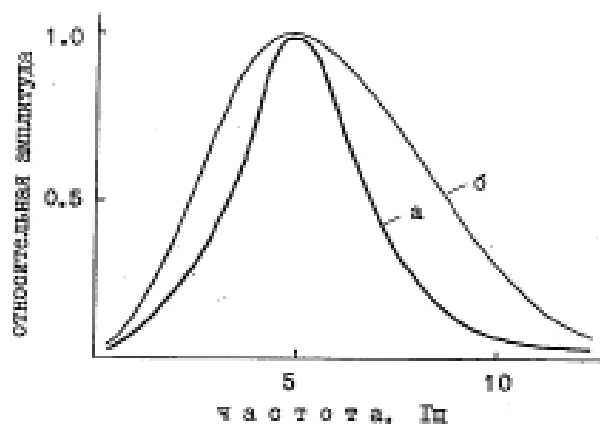


Рис. 7. Эволюция сигнала в нелинейно-упругой среде:
а - исходный сейсмический сигнал;
б - сигнал, искаженный в нелинейно-упругой среде

ник (вибратор или невзрывной импульсный источник) и стандартные условия измерений. Например, современный вибратор типа СВ-10/100 создает в своей эпицентральной зоне интенсивные сейсмические колебания, имеющие интенсивность около 7 баллов. При такой интенсивности в полной мере проявляются нелинейные процессы, количественной мерой которых может служить ширина полосы частот f нормализованного спектра или изменение площади нормализованного спектра колебаний грунта SH.

С другой стороны, на основе анализа записей сильных движений грунта было получено, что для некоторого выбранного расстояния можно записать [4]:

$$S_H / f_{cs} - \alpha, \quad (10)$$

где S_H – площадь спектра, нормализованного по максимальной амплитуде колебаний;

f_{cs} – средневзвешенная частота колебаний исследуемого грунта;

α – показатель поглощения.

Таким образом, величина отношения нормализованного спектра к частоте прямо пропорциональна поглощению энергии данной толщей.

Представляет интерес рассмотрение зависимости величины поглощения от ускорения (рис.8). Хорошо видно, что в начальной стадии, т.е. при малом уровне воздействия, поглощение увеличивается по мере увеличения воздействия, но после достижения значения ускорения $a = 0.08g$ поглощение начинает падать и достигает минимума при величине ускорения. При дальнейшем уве-

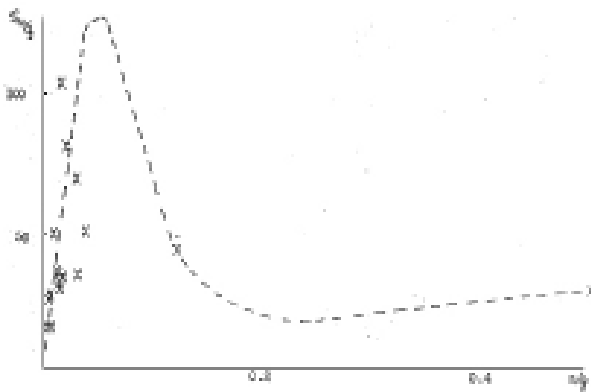


Рис. 8. Зависимость параметра S_n/f_{cs} от нормированного ускорения a/g .

личении ускорения показатель поглощения вновь растет, правда, с меньшей скоростью. Аналогичные кривые получены и для других участков, сложенных рыхлыми грунтами (Земо Бари, Ири и т.д.).

В то же время при нелинейном поведении грунтов характерно расширение спектра в ВЧ и частично в НЧ области спектра (рис.7). При этом расширение в НЧ области спектра в рыхлых грунтах, обусловленное явлением поглощения, превышает расширение, связанное с нелинейностью грунта, и таким образом поглощение «маскирует» нелинейность. В скальных грунтах, где величина поглощения значительно меньше, нелинейность среды проявляется более отчетливо. В то же время оценка нелинейности с точки зрения СМР интересна именно для рыхлых грунтов. Кроме того, при использовании в качестве параметра величины площади нормализованного спектра отсутствует возможность изучения формы спектра. В связи с этим для оценки степени нелинейности грунтов стало необходимым введение другого показателя.

В связи с этим было введено понятие площади «реального» спектра колебаний. Это – «виброспектр», или обыкновенный амплитудный спектр Фурье, рассчитываемый по сейсмограмме. Анализ инструментальных записей землетрясений показал [1], что величина S_p тесно связана с физической нелинейностью грунтов. Например, при повышении значений ускорений (рис.9) вид кривой зависимости S_p от ускорения резко меняется (Земо Бари), обретая нелинейный характер («мягкая нелинейность»). Для жестких грунтов (Они) характерна «жесткая нелинейная зависимость» (рис.9).

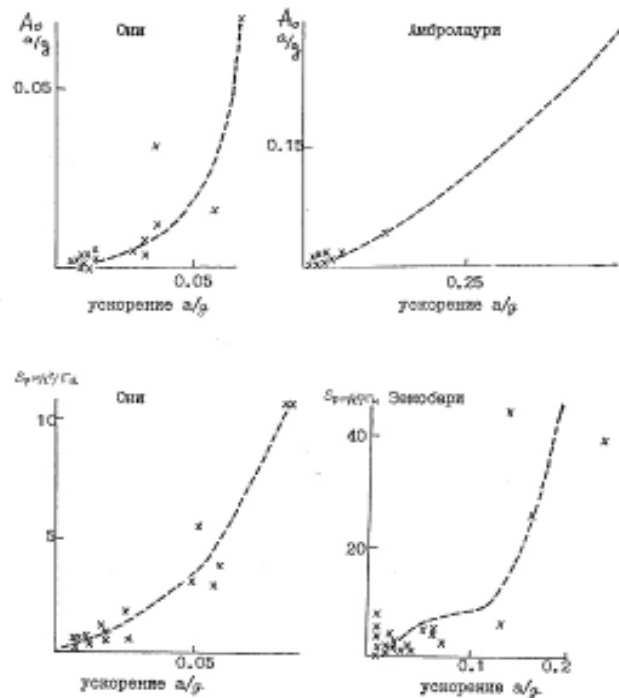


Рис. 9. Показатели движения грунта в функции нормированного ускорения a/g .

Площадь реального спектра S_p согласно определению есть произведение площади нормализованного спектра на максимальную амплитуду спектра:

$$S_p = S_n A_0 \quad (11)$$

Выражение (11) с учетом (10) примет вид:

$$S_p = \alpha A_0 f_{cs} \quad (12)$$

Таким образом, площадь реального спектра является интегральной характеристикой явлений поглощения и нелинейности, возникающих в грунтовой толще. Это подтверждает наблюдающееся при экспериментах подобие влияния на форму спектра явлений поглощения и нелинейности.

Отношение площади реального спектра к поглощению, очевидно, есть т.н. «чистая» нелинейность [4]:

$$\frac{S_p}{\alpha} = A_0 f_{cs} \quad (13)$$

При этом характеристика нелинейности грунта может быть непосредственно оценена с помощью выражения (13).

Таким образом, произведение амплитуды спектра на средневзвешенную частоту, являясь простейшей и легко измеряемой величиной, характеризует особое качество грунта – физическую нелинейность. Другими словами, введены новые показатели, которые тесно связаны с прямыми показателями поглощения и нелинейности грунтов. В отличие от традиционных показателей новые показатели непосредственно измеряются по спектрам колебаний грунтов.

Для расчета приращения балльности на основе учета нелинейно-упругого поведения грунтов или упругой нелинейности при использовании вибрационного источника получено следующее выражение [4]:

$$\Delta I = 3 \lg A_i f_{cvi} / A_0 f_{cв0} , \quad (14)$$

где $A_i f_i$, $A_0 f_0$ – произведение амплитуды спектра на средневзвешенную частоту колебаний исследуемого и эталонного грунтов.

Указанная формула характеризует нелинейно-упругое поведение грунтов в отсутствие поглощения. Необходимо отметить, что формула (9) характеризует нелинейно-упругое поведение грунтов в присутствии поглощения.

В то же время при весьма больших сейсмических нагрузках могут иметь место неупругие явления. Это привело к необходимости разработки соответствующих способов.

4.2 Сейсмическое микрорайонирование на основе учета неупругих свойств грунтов

При использовании вибрационного источника для оценки сейсмической опасности грунтов путем учета значений их неупругости были получены следующие формулы [1]:

$$\Delta I = 2,4 \lg (SP_i)_{\delta} (SP_0)_{\delta} / (SP_i)_{\delta} (SP_0)_{\delta} , \quad (15)$$

где $(SP_i)_{\delta}$ и $(SP_0)_{\delta}$ – площади реальных спектров исследуемых и эталонных грунтов в ближней и дальней зонах источника.

$$\Delta I = 3,3 \lg (A_i f_{cvi})_{\delta} (A_0 f_{cв0})_{\delta} / (A_i f_{cvi})_{\delta} (A_0 f_{cв0})_{\delta} , \quad (16)$$

где $(A_i f_{cvi})_{\delta}$ и $(A_0 f_{cв0})_{\delta}$ – амплитуды и средневзвешенные частоты исследуемых и эталонных

грунтов в ближней и дальней зонах источника.

Формулы были получены на основе физического принципа, лежащего в основе схемы, применяемой при оценке меры рыхлости грунтов [9].

5. Исследование частотных особенностей грунтов при сейсмическом микрорайонировании

Практика обследований последствий сильных и разрушительных землетрясений показывает, что на сейсмический эффект значительное воздействие оказывает период или частота собственных колебаний грунтов.

5.1. Определение преобладающих частот колебаний грунтов с помощью микросейсм

В последние годы в мире большое распространение получила оценка частотных особенностей грунтов путем отнесения горизонтальной составляющей X или Y микросейсм к вертикальной составляющей Z (рис.6б). Такой подход [1] более надежно, чем использование просто спектров микросейсм, отражает связь спектрограммы с особенностями инженерно-геологического строения площадки (рис.6а). Необходимо, кроме того, отметить, что при использовании микросейсм величина частоты колебаний характеризует поведение грунтов исключительно в условиях линейно-упругих деформаций.

5.2. Определение преобладающих частот колебаний грунтов с помощью невзрывных источников

С точки зрения большей надежности и обоснованности получаемых результатов была установлена целесообразность использования современных невзрывных источников достаточной мощности. Использование мощных импульсных и вибрационных источников позволяет полноценно исследовать поведение грунтов при нелинейно-упругих и неупругих деформациях. В частности, в некоторых случаях изменение исходной частоты колебаний достигало 20%. С другой стороны, использование современных вибрационных источников позволяет моделировать необходимую для приближения к реальным условиям дли-

тельность воздействия [1]. Таким образом, при этом происходит параметрическое изучение грунтовой толщи.

6. Оценка сейсмической опасности грунтов при изменяющемся уровне сейсмического воздействия

Существующие методы и способы сейсмического микрорайонирования, используемые в странах СНГ и за рубежом, предполагают постоянство приращения балльности между участками, сложенными различными грунтами. В то же время необходимо отметить, что особенности проявления сейсмического эффекта, например, в семибалльной зоне 9-балльного (в эпицентре) землетрясения существенным образом отличаются от сейсмического эффекта в семибалльной зоне 7-балльного землетрясения (в эпицентре). Хорошо известна, например, трудность выделения влияния грунтов или других факторов на формирование интегрального сейсмического эффекта в эпицентральной зоне сильного землетрясения. При этом существующие инструментальные методы и способы сейсмического микрорайонирования совершенно не способны адекватно прогнозировать влияние изменения уровня сейсмического воздействия на поведение грунтов соответствующих участков территории.

В то же время нелинейная связь напряжения и деформации рыхлого грунта обуславливает неодинаковое искажение фаз сжатия – растяжения и увеличение фазы растяжения в более «слабых» грунтах. Это приводит к зависимости динамических показателей движения грунта от энергии воздействия. При этом появляется возможность непосредственной оценки вариации реакции грунтовой толщи на сейсмические воздействия с изменяющейся энергией.

На основе обработки инструментальных записей сильных движений впервые получены корреляционные соотношения между характеристиками землетрясений (магнитуда, эпицентральный расстояние, глубина очага), параметрами инструментальных записей землетрясений (длительность, средневзвешенная частота колебаний, ускорение) и локальными грунтовыми условиями [1].

На основе специальных исследований была разработана методика таких оценок с помощью мощных импульсных и вибрационных источников

[1-4]. Рассчитанное уменьшение приращения балльности между грунтами выбранных участков, обусловленное увеличением магнитуды от 3.0 до 5.3 при Рачинском землетрясении (Грузия, 1991), достигало 1.5 балла [3, 5, 17].

В качестве источников колебаний в работах могут быть использованы современные импульсные (Dinoseis, СИ-32, ГСК-6, ГСК-10 и т.д.) и вибрационные источники (VSH-8, СВ-10/100 и т.д.). По результатам исследований получено 16 патентов Российской Федерации.

Заключение

На Северном Кавказе необходимо активно развивать научные исследования в области геофизики, сейсмологии и сейсмостойкого строительства. Землетрясения и другие природные и техногенные катастрофы не признают границ, а с другой стороны, сегодня ни одна страна не может полноценно осилить широкомасштабные научные исследования без взаимобмена новыми технологиями и опытом. Поэтому во всем мире весьма активно реализуется объединение ученых из различных стран в общие научные проекты для решения важных научных и практических задач.

В настоящее время выполнено и выполняется много международных проектов, посвященных оценкам сейсмической опасности и риска на Кавказе. К сожалению, приходится констатировать, что в них практически не участвуют ученые Северного Кавказа. Это, с одной стороны, обусловлено несколько более низкой сейсмической активностью в большей части региона и, с другой – почти полным отсутствием научных учреждений соответствующей направленности. В то же время, на Северном Кавказе, кроме землетрясений, внимания заслуживают опасные геологические процессы в виде оползней, селей, наводнений, камнепада, схода ледников, вероятность проявления которых значительно повышается даже при умеренных землетрясениях.

В свете развития событий, обусловленных извержением вулкана Этна в Италии, особое внимание должно быть уделено оценке активности вулканов в регионе. В связи с этим необходимо отметить, что ряд лет учеными России изучается вулкан Эльбрус. Несомненно, подлежит изучению и вулкан Казбек. Это тем более важно, что активизация вулканов предваряется или со-

проводятся сильными землетрясениями, что предполагает, в свою очередь, разработку последовательной мониторинговой стратегии, создание и развитие долговременных наблюдений с целью снижения тяжести последствий от природных и техногенных катастроф.

Адекватная оценка опасности является важным элементом управления сейсмическим риском. Использование современных мощных невзрывных источников с высокой стабильностью воздействия и новых эффективных показателей грунтового движения, а также соотношений для расчета приращений балльности, полученных при развитии физичес-

ких основ сейсмического микрорайонирования, приводит к значительному расширению возможностей сейсмического метода. Разработанные способы позволяют непосредственно учитывать упругую нелинейность, неупругость и оценивать влияние уровня сейсмического воздействия при расчете приращения интенсивности или балльности. Рассмотренные технологии, большинство из которых успешно использовалось в практических работах при оценке сейсмической опасности, могут рассматриваться в качестве основы для полноценного научного обмена в процессе сотрудничества специалистов в области инженерной сейсмологии.

Литература

1. **Заалишвили В.Б.** Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования. – Владикавказ.: СО НЦ. 1998. 76 с.
2. **Заалишвили В.Б.** Способ сейсмического микрорайонирования. Патент Российской Федерации № 2075095, 1991.
3. **Заалишвили В.Б.** Способ сейсмического микрорайонирования. Патент Российской Федерации № 2105997, 1998.
4. **Заалишвили В.Б.** Физические основы сейсмического микрорайонирования. – М.: ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, 2000. 367 с.
5. **Заалишвили В.Б., Куранова О.И., Заалишвили З.В., Харебов К.С.** Способ сейсмического микрорайонирования. Патент Российской Федерации № 2162606, 2001.
6. **Медведев С.В.** Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962. 284с.
7. **Максимов А.Б.** О сейсмической жесткости грунтов. Экспериментальная сейсмология. – М.: Наука, 1971. С.145-152.
8. **Наииф А., Джоуж Д., Хендерсон Дж.** Демпфирование колебаний. – М.: Мир, 1988. 448с.
9. **Николаев А.В.** Сейсмические свойства рыхлой среды. Физика Земли. № 2, 1967. С.23-31.
10. **Оценка** влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность // Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. – М.: Наука, 1988. 224с.
11. **Рекомендации** по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Госстрой СССР, 1985. 72с.
12. **Рекомендации** по сейсмическому микрорайонированию (СМР-73), Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний. – М.: Стройиздат, 1974. 65с.
13. **Рогожин Е.А.** Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона. ДАН (в печати)
14. **Старовойт О.Е.** Сейсмические наблюдения. В кн. Природные опасности России. Т.2. Сейсмические опасности. – М.: Крук, 2000. С. 38-45.
15. **Уломов В.И.** Сейсмическое районирование. В кн. Природные опасности России. Т.2. Сейсмические опасности. – М.: Крук, 2000. С. 66-94.
16. **Zaalishvili V.** Modern concept of seismic microzonation. Proceedings of 11th ECEE. – Paris.1998. CD Rom. 10с.
17. **Zaalishvili V.** Strong motions in absorbing nonlinear medium and problems of their registration. Strong motions Instrumentation for Civil Engineering Structures. – Kluwer Academic Publishers in Netherlands. 2001. P. 561-572.

Доклад представлен на **Общем собрании ВНЦ.**
Владикавказ, 2002 г.