

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алоян П. Г. Состояние сырьевой базы цветной металлургии Армении и перспективы ее расширения и эффективного освоения.—Тр. Арминпроцветмет, Ереван: 1987, с. 7—14.
2. Алоян П. Г. Система техногенных критериев по комплексной оценке и рациональному использованию сырьевых ресурсов горнорудной промышленности Армении.—Тр. Арминпроцветмет, Ереван: 1993, с. 16—23.
3. Алоян П. Г. Промышленная типизация и управление качеством руд на основе геолого-технологического картирования.—Изв. НАН РА, Науки о Земле, 1994, т. XLVII, № 1—2, с. 49—55.
4. Вартамян С. У. Обобщенный петрофизический показатель для количественной оценки горно-технических условий месторождения.—Горный журнал, Свердловск. 1990, № 8, с. 18—26.

Известия НАН РА, Науки о Земле, 1995, XLVIII, № 2—3, с. 104—112

С. Ц. АКОПЯН, Р. Г. ГРИГОРЯН, А. А. МАРТИРОСЯН

### ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА АРАРАТСКОЙ МЕЖГОРНОЙ ВПАДИНЫ

Уроки Спитакского землетрясения заставляют снова обратиться к проблемам, связанным с оценкой физических свойств грунтов и их поведением при сильных землетрясениях. Актуальность этой проблемы еще более очевидна для Араратской впадины, где сосредоточены основные людские и производственные ресурсы республики. В настоящей работе совершена попытка моделирования осадочного чехла Араратской впадины, которая является основой для расчета реакции осадочной толщи на сейсмическое воздействие и также может применяться в других исследованиях.

Характер сейсмических колебаний на конкретной площадке определяется спектром излучения источника колебаний, строением и свойствами среды на пути распространения сейсмических волн от очага к площадке и локальными грунтовыми условиями данной местности.

В соответствии с ныне действующими строительными нормами и правилами сейсмологическая информация для расчетов динамических нагрузок строений выдается в максимально ожидаемых ускорениях [7]. Для расчета сооружений массовой застройки за основу берется значение ускорения из карты общего сейсмораионирования региона и умножается на коэффициент, который определяется по категории грунта на площадке.

При оценке сейсмической опасности ответственных объектов требования иные. На основе тектонической ситуации региона сначала моделируются возможные очаги землетрясений, представляющие опасность для данной площадки. Исходя из геологических, тектонических и сейсмологических предпосылок, каждой зоне присваивается определенный сейсмический потенциал, выраженный в магнитудах. Далее выбирается региональная модель затухания амплитуды сейсмической волны в зависимости от расстояния, магнитуды и рассчитываются максимальные горизонтальные ускорения, которые могут возникнуть от возможных очагов землетрясений. На последнем этапе вводятся поправки за влияние локальных грунтовых условий исследуемой площадки. Этот этап особенно важен, если конкретная структура выполнена мощной толщей осадочных отложений. Окончательный расчет динамических нагрузок конкретных строений выполняется с использованием базовых акселерограмм с расчетным максимальным ускорением.

Эффект влияния грунтовых условий на параметры сейсмических колебаний достаточно сложен и для точного расчета необходимо детальное знание сейсмического разреза до коренных пород.

В данной работе представлено моделирование слоистой структуры осадочного чехла Араратской межгорной впадины на основе известных геолого-геофизических данных. Составленные модели служили основой для аналитических расчетов характеристик реакции осадочной толщи на сейсмические воздействия. Использовался матричный метод расчета многослойных сред с горизонтальными границами раздела [5]. Проведено также трехмерное моделирование основных отражающих границ для дальнейших расчетов с учетом кривизны нижних границ.

Расчетная часть и связанные с ней результаты данной работы более подробно будут описаны в дальнейших публикациях.

### *Геолого-геофизическая характеристика района исследования*

Араратская впадина расположена в бассейне среднего течения р. Аракс и имеет площадь около 5300 км<sup>2</sup>. Левобережная ее часть (территория РА) занимает площадь 3600 км<sup>2</sup>. Араратская впадина представляет собой сложную геологическую структуру, которая в последней стадии своего развития (палеоген-антропоген) испытала относительное опускание и явилась областью мощного осадконакопления. Верхняя часть осадочного комплекса Араратской впадины выполнена в основном озерно-речными отложениями нижнечетвертичного возраста, представленными многократным чередованием балунно-галечниковых образований, песков, суглинков и глин. На большей площади впадины, в основании озерной толщи, залегает покров долеритовых лав, в свою очередь залегающий на размытой поверхности складчатых отложений миоцена и палеогена. Отложения миоцена в верхней части разреза представлены глинами сарматского возраста, мощность которых, по данным структурных скважин, превышает 1000 м.; в нижней части — гипсоносно-соленосной свитой. В общей структуре Араратской впадины выделяются две депрессии: Октемберянская и Приараксинская, разделенные Маркаринским поднятием. С севера, северо-востока и юго-запада Араратская котловина ограничена региональными сейсмоактивными разломами и разбита более мелкими тектоническими нарушениями на сложную систему блоков.

Данная территория — наиболее изученный в геологическом отношении регион Армении. Здесь пробурено большое количество скважин различного назначения. На рис. 1 представлена сеть профилей, вдоль которых на основе инженерно-геологических (скважинных) данных построены детальные геологические разрезы (Паносян С. Б., Казарян В. Х., 1984).

Сеть состоит из одного продольного и 12 поперечных профилей. Изучено строение осадочной толщи вплоть до отложений верхнего миоцена. Изучение более глубоких горизонтов основывалось на данных глубинного сейсмического зондирования, сейсморастворочных работ и глубокого бурения.

В практике сейсмического микрорайонирования принято оценивать верхнюю часть разреза до кровли коренных пород с  $V_s > 800$  м/с. Особенность данных разрезов состоит в том, что залегающая на плотном основании рыхлая толща наносов покрыта сверху четвертичными базальтами с более высокой сейсмической жесткостью, чем в подстилающих осадках. Учитывая эту особенность, в качестве нижней

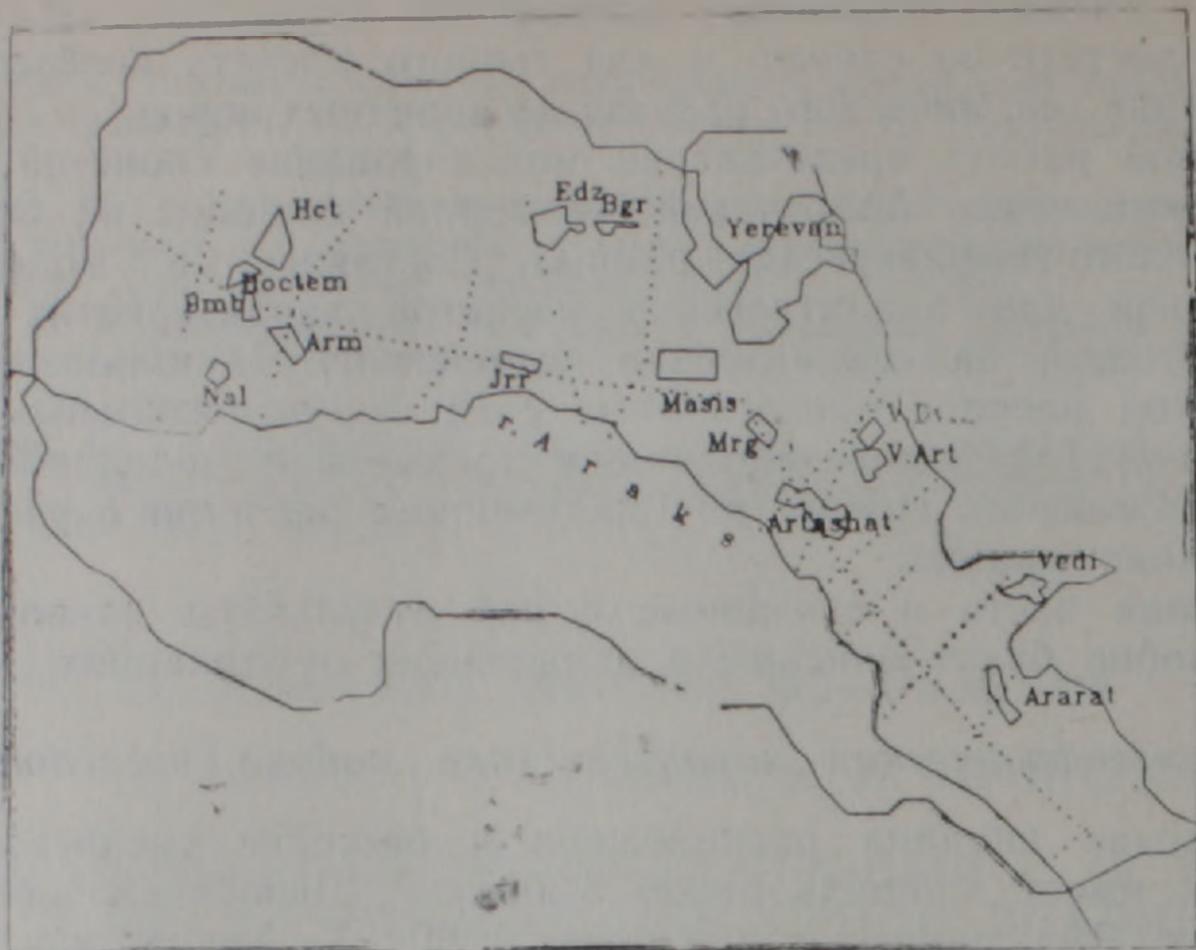


Рисунок 1. Схематическая карта района исследований: границы района, профили геологических разрезов

границы моделируемой толщи выбрана кровля соленосно-гипсоносных глин.

### *Принципы построения моделей*

Для учета влияния локальных грунтовых условий аналитическими методами моделируется слоистая структура среды. Обычно модель грунта представляется в виде слабопоглощающей горизонтально-слоистой структуры, лежащей на упругом полупространстве [5, 6]. Вычисляются колебания свободной поверхности под воздействием плоской объемной волны, падающей на подошву нижнего слоя.

По комплексу геологических, геофизических и др. данных построены горизонтально-слоистые литолого-стратиграфические модели структур рыхлой толщи и на основе этих моделей составлены теоретические модели с соответствующими физическими параметрами пород.

В строении структур изучаемой территории преобладает горизонтальная слоистость. При моделировании был проведен анализ границ разрезов—их выдержанность по горизонтали и вертикали. Известно, что для достоверности расчетов горизонтальная слоистость среды должна выдерживаться на протяжении не менее пяти длин волн [4, 6]. В соответствии с этим минимальные горизонтальные размеры моделей составляют 2,5 км. С целью придания большей достоверности моделям выдерживался принцип привязки к каждой из них хотя бы одной скважины.

Кроме верхних низкоскоростных слоев, мощность которых, как правило, меньше 15 м, толщина слоев в моделях обычно превышает 15 м. Разрешающая способность слоев определяется соотношением  $H/l > 0,1$ , что в инженерно-сейсмологическом диапазоне частот соответствует  $H > 10$  м. При укрупнении слоев средние значения плотностей и скоростей вычислялись по формулам:

$$V_{\text{ср}} = H / \sum \Delta t_i \quad (1)$$

$$\rho_{\text{ср}} = \sum \rho_i h_i / H, \quad (2)$$

где  $H$ —общая мощность укрупненного слоя,  $\rho_i$ ,  $h_i$ ,  $\Delta t_i$ —соответственно плотности, мощности и времена пробега в тонких слоях, входящих в укрупненный.

### Моделирование физических параметров пород

При расчетах используются следующие параметры реальной среды: скорости продольных и поперечных волн в среде  $V_p$ ,  $V_s$ , мощности слоев  $H$ , плотности пород  $\rho$  и декременты поглощения волн  $\Delta\rho$ ,  $\Delta s$ . На территории Араратской впадины приходится иметь дело с породами, для которых значения этих параметров варьируют в широких пределах.

Для верхних слоев осадочной толщи исследуемой территории значения скоростей  $V_p$ ,  $V_s$  достаточно хорошо изучены сейсморазведочными работами. При отсутствии прямых данных по одному из параметров, значения его приходится прогнозировать. Между скоростями  $V_p$  и  $V_s$  установлены линейные связи с соответствующими коэффициентами для разных типов грунтов [3]. Например, для грубообломочных грунтов зависимости следующие:

$$V_s = (0.50 \pm 0.01)V_p - (0.035 \pm 0.008) \quad (3)$$

$$V_s = (0.526 \pm 0.016)V_p - (0.496 \pm 0.09) \quad (4)$$

(3)—для сухих, (4)— для водонасыщенных грунтов,

При переходе от воздушно-сухих к водонасыщенным грунтам скорости  $V_p$  увеличиваются в 3—4 раза, причем порядок роста уменьшается с увеличением скорости. Скорости  $V_s$  при этом существенно не изменяются.

Скорости упругих волн для одного и того же вещественного состава увеличиваются с глубиной. В воздушно-сухих песчаных и грубообломочных грунтах скорости  $V_p$ ,  $V_s$  могут увеличиваться в 1.5—3 раза при изменении глубины в пределах первых 30 м. В водонасыщенных грунтах интенсивность роста скоростей с глубиной снижается:  $V_p$  может увеличиться в 1.2—1.4 раза,  $V_s$ —в 2 раза. Зависимость скоростей от глубины выражается формулой [4]:

$$V(H) = V_0 + AH^n, \quad (5)$$

где  $V_0$ —начальная скорость (м/с).  $H$ —глубина (м),  $A$  и  $n$ —коэффициенты уравнения, значения которых установлены для разных типов и состава грунтов. Существует аналогичная зависимость для отношения скоростей  $V_p/V_s$ .

Важной характеристикой пород является плотность. Плотности горных пород, развитых на территории Араратской впадины, достаточно хорошо изучены работами прошлых лет [1]. Наибольшими плотностями обладают базальты до 3 г/см<sup>3</sup>, наименьшими—0.8 г/см<sup>3</sup> песчаные рыхлые грунты. У осадочных пород, принадлежащих к одной группе, могут наблюдаться большие изменения плотности.

Вопросы определения декрементов поглощения пород слабо изучены. За основу взяты экспериментальные значения, полученные Г. И. Гуревичем и другими авторами [4, 8, 9]. При расчетах, в качестве поглощающей модели, выбрана линейно-неупругая модель Г. И. Гуревича. В рамках этой модели в случае слабого затухания в поглощающем слое скорости волн являются частотно-зависимыми комплексными функциями [6]. В работе [2] приведены график и таблица зависимости  $\Delta\rho/\Delta s$  от  $V_p/V_s$  для разных горных пород, полученные на основе экспериментальных работ. Если они водонасыщены,

Сводная таблица физических параметров горных пород территории Араратской впадины

Породы	Состояние пород	$V_p$ км/сек	$V_s$ км/сек	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta p$	$\Delta s$
Супеси	естест. влажность	0.30—1.10	0.15—0.25		0.175	0.35
Супеси	(водонасыщенные)	1.40—1.70	0.10—0.25	1.40—1.80	0.080	0.35
Суглинок		1.30—1.90	0.30—0.50	1.45—2.05	0.175	0.35
Песчано-глинистые отложения с включением галечника	(водонасыщенные)	1.10—1.90	0.25—0.50	1.40—1.75	0.020	0.15
Мелкоречной песок с галечником	(водонасыщенные)	0.70—1.20	0.15—0.25	1.30—1.80	0.02	0.08
Мелкозерн. песок	(водонасыщенные)	0.70—1.20	0.09—0.65	1.30—1.90	0.08	0.25
Глина		1.70—2.00	0.35—0.50	1.30—2.00	0.06	0.25
Валуно-галечник						
в песке	естест. влажность	1.10—1.40	0.15—0.25		0.03	0.09
в песке	(водонасыщенные)	1.40—1.80	0.15—0.30	1.60—2.00	0.02	0.20
в глине	(водонасыщенные)	1.80—2.00	0.30—0.40		0.02	0.08
Туфы, туфобрекчии	естест. влажность	1.60—3.00	0.50—0.80		0.09	0.08
	(водонасыщенные)	0.60—1.60	0.16—1.00	1.06—2.32	0.09	0.08
Базальты						
плотные		3.50—4.00	1.86—2.10	2.49—2.84	0.08	0.08
трещиноватые		1.80—3.00	0.35—2.00	1.80—2.45	0.09	0.09
обломки в песке	(водонасыщенные)	1.80—2.30	0.35—0.60	1.70—2.00	0.10	0.10
Песчано-глинистые отложения (сармат)		2.20—2.70	0.65—0.75	2.20—2.40	0.04	0.04
Соленосно-гипсоносная толща		3.5	1.8	2.65	0.02	0.02

то декременты затухания поперечных волн превышают декременты затухания продольных волн в несколько раз, т. е. отношение  $\Delta p/\Delta s$  становится значительно меньше единицы, что соответствует более резкому возрастанию  $V_p/V_s$ .

Для водонасыщенных рыхлых пород отношения  $V_p/V_s$  приобретают большие значения, а отношения  $\Delta p/\Delta s$  меньше 0,5, что характерно и для рассматриваемой территории. На территории Араратской впадины преобладают породы, для которых значения  $\Delta s$  могут значительно превышать 0,04—мягкие осадочные породы, грунты различной степени рыхлости и водонасыщенности.

На основе собранных материалов составлена сводная таблица физических параметров горных пород, слагающих Араратскую впадину (табл. 1).

### Основные результаты

На основе структурных построений проведено моделирование физических параметров пород и составлена сводная таблица значений этих параметров. Составлены 75 плоско-параллельных, горизонтально однородных моделей, расположенных вдоль выбранных профилей. Максимальная глубина моделей составляет 1700 м. Максимальное количество слоев в моделях—19. Пример модели приведен в таблице 2.

Таблица 2

Пример расчетной модели по участку одного из профилей.

Слой	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	H, м	$\Delta p$	$\Delta s$
1	1.50	0.30	1.50	0.005	0.08	0.35
2	1.80	0.30	1.90	0.035	0.02	0.20
3	1.70	0.30	1.80	0.013	0.10	0.40
4	1.60	0.20	1.70	0.038	0.02	0.20
5	1.75	0.30	1.80	0.020	0.06	0.25
6	1.85	0.30	1.95	0.010	0.02	0.20
7	2.00	0.95	1.90	0.030	0.09	0.09
8	2.40	0.70	2.12	0.090	0.04	0.04
9	3.50	1.80	2.65	0.000	0.02	0.02

По каждой из моделей рассчитываются спектральные функции трансформации среды, которые характеризуют саму слоистую толщину, независимо от формы падающей волны. Эти функции представляют среду как частотно-избирательную систему с возможными резонансными явлениями, обусловленными интерференцией многократно отраженных волн. На основе этих функций построены площадные карты спектральных усилений амплитуды падающей волны, в разных частотных диапазонах. Надо отметить, что карты подобного содержания получены впервые и могут найти прямое применение при сейсмомикрорайонировании и планировании сейсмостойкого строительства. Получены интересные данные, связанные с расчетом синтетических сейсмограмм. При этом в качестве входной волны взят дельта-импульс. На рис. 2 представлены расчетные сейсмограммы моделей главного продольного профиля для Р волны.

В результате обработки синтетических сейсмограмм получены карты времен запаздываний Р- и S-волн, а также карты длительности импульсной реакции. Эти результаты имеют важное значение для коррекции времен вступлений волн на сейсмостанциях при определении параметров землетрясений. Значение формы импульсной ре-

акции и значений ее длительности может быть полезным при идентификации пиков на сейсмограммах. Проведены также расчеты колебаний точек поверхности, когда в качестве базового входного сигнала служит полученная на сеймостанции Гукасян запись ускорений Спитакского землетрясения.

При этих построениях не учитывается погрешность, которая совершается при замене реальной среды плоско-параллельной моделью. Между тем, рассматриваемая в работе территория является частью целостной геологической структуры—типичной наложенной межгорной впадины, а кривизна нижних отражающих границ существенно влияет на характеристики колебаний грунтов. Имея в виду, что

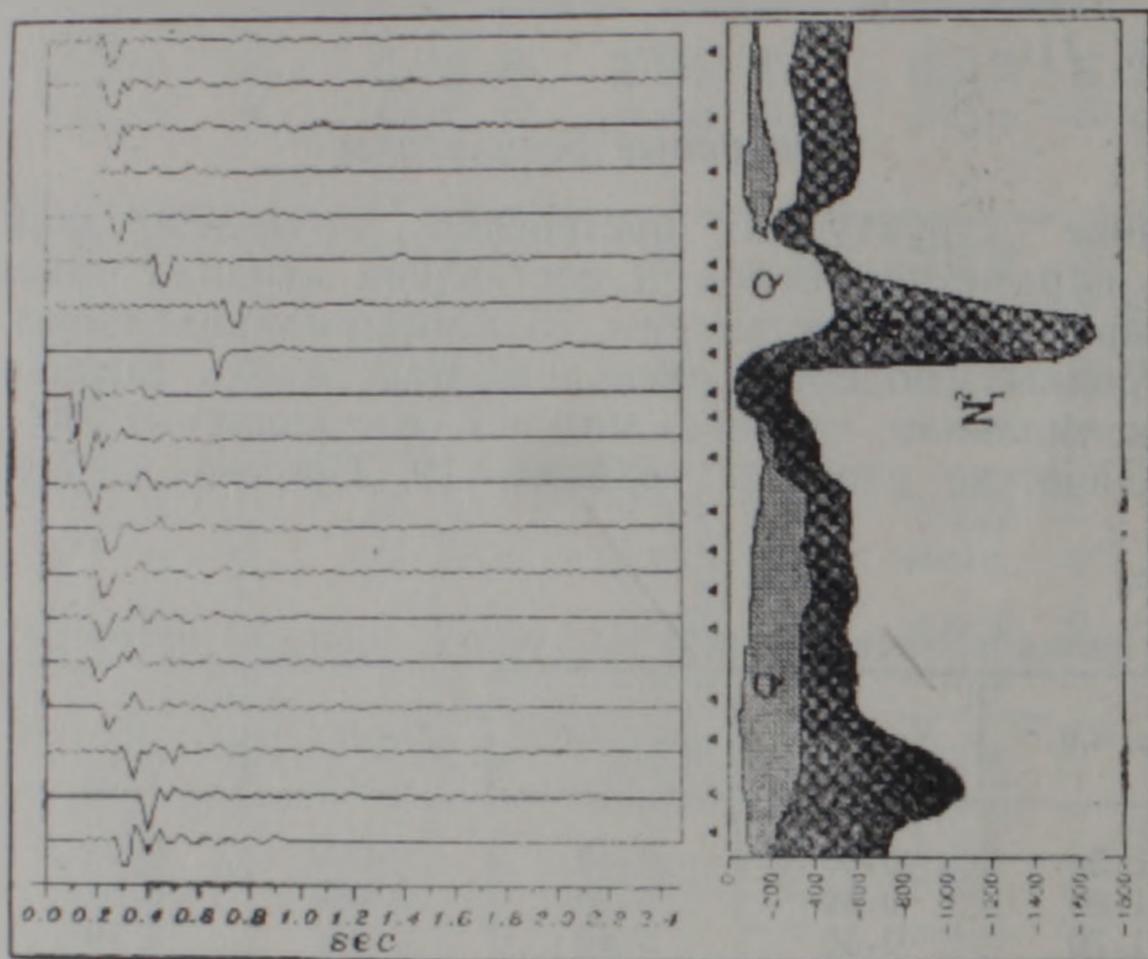


Рисунок 2. Расчетные синтетические сейсмограммы моделей главного продольного профиля

дальнейшие расчеты будут проведены методом конечных элементов для границ произвольной геометрической формы, проведено трехмер-

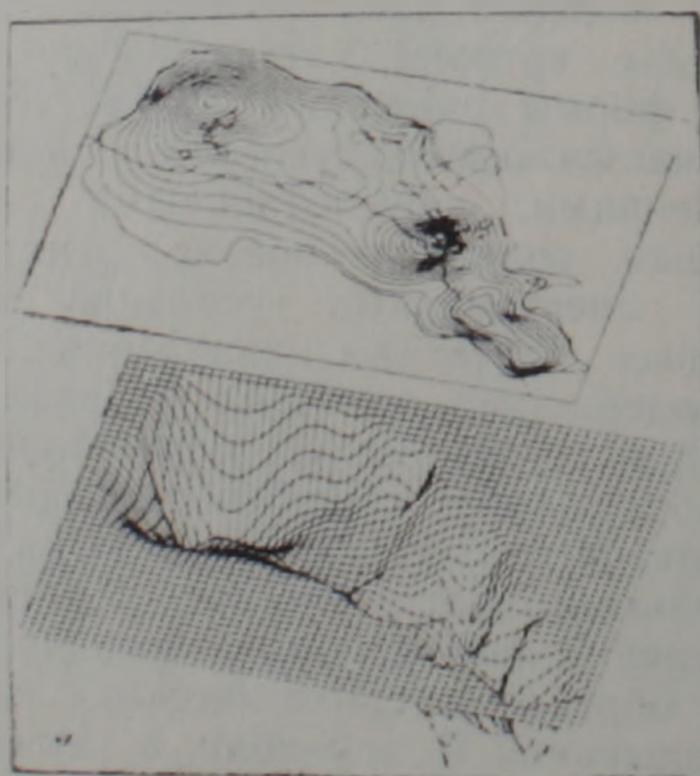


Рисунок 3. Трехмерная модель нижней границы моделируемой толщи

ное моделирование основных отражающих границ по всей территории Араратской впадины. На рис. 3. приведен результат такого построения для кровли соленосно-гипсоносной толщи.

Расчеты проводились на ЭВМ. При моделировании основных отражающих границ и составлении площадных карт использованы интерполяционные методы. Хотя имеющиеся геолого-геофизические данные относятся только к левобережной части впадины, для учета целостности структуры результаты экстраполировались и на правобережную часть.

Часть исследований, представленных в данной работе, проведена в рамках проекта INTAS 94—0232.

Национальная Служба Сейсмической  
Защиты РА. Ереван

Поступила 19.XII.1995.

Ս. Յ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ռ. Գ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա. Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ԱՐԱՐԱՏՅԱՆ ՄԻՋԼԵՌՆԱՅԻՆ ԳՈԳԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՆՍՏՎԱԾՔԱՅԻՆ ԾԱԾԿՈՑԻ  
ՖԻԶԻԿԱ-ԵՐԿՐԱՔԱՆԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Աշխատանքում ներկայացված է Արարատյան միջլեռնային գոգավորության նստվածքային ժաժկոցի ֆիզիկա-երկրաբանական մոդելավորումը, որը հիմք է ծառայում սեյսմիկ վտանգի վրա տեղական գրունտային պայմանների ազդեցության գնահատման համար: Այս խնդիրը առանձնապես կարևոր է բննարկվող տարածքի դեպքում, քանի որ այն հանդիսանում է Հայաստանի խիտ բնակեցված շրջանը:

Օգտագործելով ինժեներական և երկրաբանա-երկրաֆիզիկական հետազոտությունների տվյալները, կազմված են 75 հարթ զուգահեռ, համասեռ հորիզոնական մոդելներ ըստ մեկ երկայնական և 12 հատող պրոֆիլների: Ամեն մի մոդելի համար Թոնպսոն-Հասքելի մատրիցական մեթոդով հաշվարկվում են հաճախային բնութագրերը և սինթետիկ սեյսմոգրամանները: Միջարկման մեթոդով կատրված է հիմնական անդրադարձնող սահմանների եռաչափ մոդելավորում:

Աշխատանքի արդյունքները կարող են օգտագործվել ինժեներական սեյսմոլոգիայում և սեյսմիկ ռիսկի գնահատման համար:

Այս աշխատանքում ներկայացված հետազոտությունների մի մասը կատարվել է INTAS 94-0232 նախագծի շրջանակներում:

S. TS. HAKOBIAN, R. G. GRIGORIAN, A. A. MARTIROSIAN

PHYSICAL AND GEOLOGICAL SIMULATION OF THE  
SEDIMENTARY COVER OF THE ARARAT  
INTERMOUNTAIN DEPRESSION

Abstract

The Spitak earthquake lessons had forced us to address to the problems related to evaluation of soil physical properties and their behaviour during strong earthquakes once more. This problem urgency is absolutely obvious for the Ararat depression where the main human and production resources are located. The present paper attempts to simulate the sedimentary cover

of the Ararat depression; this simulation is a basis for calculation of sedimentary series response to seismic effects, and it can be used in other researches too.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Геология Армении, том X, «Геофизика» под ред. Акопяна Ц. Г. Ереван, 1972.
2. Гуревич Г. И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: «Наука», 1988.
3. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по СМР под редакцией О. В. Павлова, М.: «Наука», 1988.
4. Павлов О. В., Рогожина В. А. Сейсмическое микрорайонирование. М.: «Наука», 1988.
5. Ратникова Л. И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М.: «Наука», 1988.
6. Ратникова Л. И. Сакс М. В. Влияние скоростных и диссипативных параметров на резонансные свойства грунтов. Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 23, 1982, с. 18—29.
7. СНиП. II-2.02-94. Ереван, 1995.
8. Справочник Физических констант горных пород под ред. Р. Кларка, М.: «Мир», 1969, с. 28—33, 183—194.
9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник. М.: «Недра», 1988.

Известия НАН РА, Науки о Земле, 1995, XLVIII, № 2—3, с. 112—

Э. Е. ХАЧНЯН

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ\*)

Рассматривается задача определения динамических характеристик неоднородных грунтовых оснований. Считается, что основание сооружения сложено из  $n$  пластов с различными физико-механическими характеристиками и мощностями. Описывается методика точного решения задачи в общем виде и в случае двухслойного основания. Для общего случая энергетическим методом получена окончательная формула для определения значений преобладающего периода основания, рассмотрены отдельные примеры.

Анализ результатов записей землетрясений показывает, что величины горизонтальных, вертикальных и вращательных перемещений, скоростей и ускорений грунта при землетрясениях на территории с практически одинаковыми эпицентрными расстояниями существенно зависят от геологических условий места регистрации, физико-механических, прочностных, деформационных и акустических характеристик залегающих грунтов. Кроме того, результаты анализа последствий большинства сильных землетрясений показывают, что в зависимости от грунтовых условий и конструктивного решения сооружения, их повреждения обусловлены или осадками, наклонами и опрокидыванием, или образованием больших относительных деформаций и повсеместных трещин во всем объеме сооружения. Таким образом, грунтовые условия не только значительно изменяют кинематические параметры сейсмического воздействия, но и существенно изменяют характер повреждения зданий и сооружений. Все эти об-

\*) Эта работа была поддержана и финансирована Центром инженерных исследований АУА, руководству которого автор приносит свою благодарность. The work was supported and financed by AUA ERC and the author acknowledges the management staff.