

# ВЛИЯНИЕ ТАЛАСО-ФЕРГАНСКОГО РАЗЛОМА НА ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

*Н.Г. Гамбурцева, Н.А. Долбилкина<sup>1</sup>, И.А. Санина, Т.В. Данилова,  
О.П. Кузнецов, О.А. Усольцева*

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Проанализированы сейсмические записи, полученные при сейсмическом просвечивании Токтогульской ГЭС в 1974–1985 гг. и записи ядерных взрывов за 1970–1989 гг. Анализ кинематических и динамических параметров сейсмических волн показал их значимые временные изменения на станциях, расположенных вблизи Таласо-Ферганского разлома. Показано, что зоны влияния разлома на динамику сейсмических волн может достигать 30 км.

## Введение

Геологическими исследованиями показано, что разрывные нарушения горных пород могут иметь различный характер: от единичных трещин до обширных зон трещиноватых и раздробленных пород. Проведенный анализ теоретических и экспериментальных опубликованных работ, касающихся влияния разломных зон на динамические и кинематические параметры сейсмических волн в разных геолого-тектонических условиях, показывает, что влияние разломов на параметры сейсмических волн зависит от строения разломной зоны, азимута и глубины просвечивания, типа сейсмической волны [Гамбурцев, 1978; Гамбурцев, 1992; Добровольский и др., 1981; Кочарян, Спивак, 2003; Сейсмические..., 1978; Сейсмическое..., 1983; Сейсмический..., 1986; Султанов и др., 1982].

Для изучения влияния Таласо-Ферганского разлома на параметры сейсмической записи в настоящей работе использованы данные сейсмического просвечивания Токтогульской ГЭС в 1974–1985 годах и данные сейсмического просвечивания с использованием в качестве источника ядерных взрывов, производимых на Семипалатинском полигоне в течение 1970–1989 годов. Анализировались кинематические и динамические параметры сейсмических волн и их временные вариации при регистрации этих волн до зоны разлома и при пересечении ими зоны разлома.

## **Регулярное сейсмическое просвечивание среды, содержащей разлом под Токтогульской ГЭС при использовании химических взрывов (сравнительно малые глубины)**

Проведен дополнительный анализ сейсмических записей, полученных при просвечивании среды под Токтогульской ГЭС [Добровольский и др., 1981]. Схема наблюдений приведена на рис. 1. Диапазон эпицентральных расстояний для станций наблюдения – 30–63 км, при этом глубина просвечивания охватывает верхнюю часть земной коры. Взрывы производились на дне озера Чон-Коль. Ежегодно проводилась серия из 5–10 взрывов в течение 15 дней. Основная часть записей получена на передвижных экспедиционных станциях с трехкомпонентной

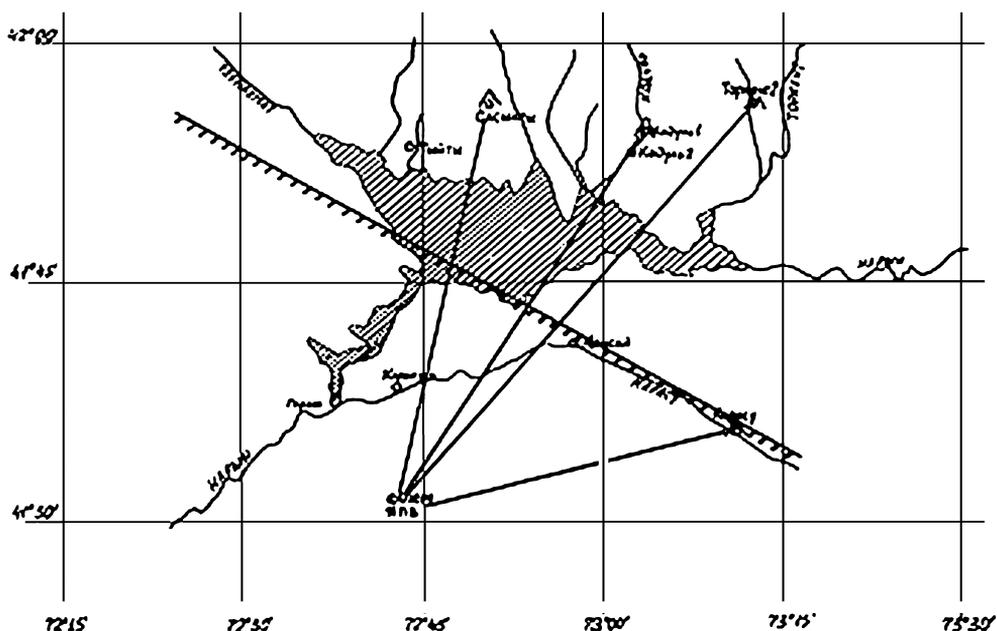


Рис. 1. Схема сейсмического просвечивания Токтогульской ГЭС

видимой записью в диапазоне периодов 0,07–1 сек с увеличением 500 тыс. Станции были оснащены собственным кварцевым отметчиком времени и радиоканалом. Временная привязка записей осуществлялась по сигналам времени, передаваемым с пункта взрыва по радиостанции РСР-300. Кроме того, на всех станциях и пункте взрыва регистрировались сигналы точного времени по программе «Маяк». Временная развертка составляла 50 мм/с, а на контрольных станциях (рядом со взрывпунктом) – 160 мм/с. Точность определения времен пробега волн определялась точностью привязки радиосигналов на сеймостанции к сигналам на сеймограммах взрывпункта. В результате точность определения времен пробега волн не хуже 0,01.

Сейсмические лучи от пункта взрыва до станций Торкент, Сасыкты и Кодуль пересекают разлом, а станция Карасу находится вблизи разлома, в зоне его влияния. Измерялись времена первых вступлений (табл. 1) и амплитуда первой фазы продольной волны, так как она хорошо и без искажений записывается на всех станциях. В табл. 2 приведены средние значения логарифмов амплитуд с учетом поправки за мощность взрыва. Рассчитаны кажущиеся скорости  $V_p$  для всех станций, и на рис. 2 показаны их временные вариации. Анализ времен пробега и скоростей показывает следующее: на всех станциях происходили почти синхронные их изменения, превосходящие погрешности измерения. Видно, что скорости изменяются на 0,30–0,75% начиная с 1974 до 1982–1983 гг., и наибольшие изменения (0,75%) наблюдаются на станции Карасу, которая находится в зоне влияния Таласо-Ферганского разлома.

Анализ амплитуд Р-волн (табл. 2) позволяет считать, что к северу от водохранилища и от Таласо-Ферганского разлома изменений амплитуд продольных волн за исследуемый период не происходило. В то же время на станции Карасу интен-

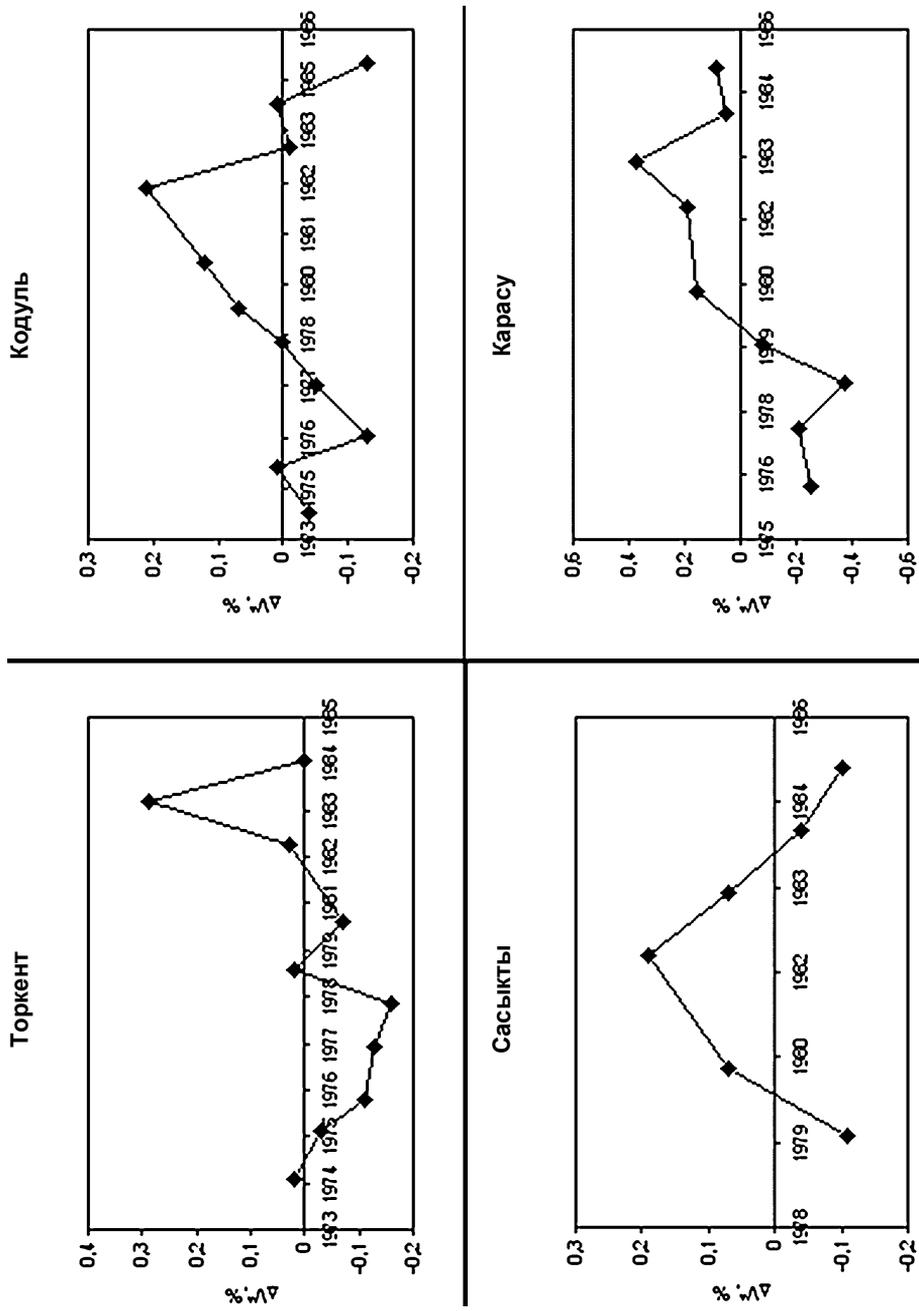


Рис. 2. Вариации скоростей пробега на разных станциях за 1974–1985 гг. при сейсмическом просвечивании Токтогульской ГЭС

сивность амплитуд в 10–25 раз превосходит амплитуды на других станциях и они заметно меняются с течением времени (рис. 3), причем особенно интенсивно амплитуды растут к 1984–1985 гг. Одна из возможных причин этого состоит в следующем: зона Таласо-Ферганского разлома находясь за створом плотины, там, где река Нарын поворачивает на восток, оказалась затопленной и по этой раздробленной зоне в течение ряда лет постепенно просачивалась жидкость, меняя гидрологические условия таким образом, что к 1984 г. этот процесс достиг местоположения сейсмостанции, и это привело к росту амплитуд продольной волны. Но нельзя отвергать гипотезу перестройки поля напряжения в данном регионе, что могло наиболее сильно сказаться в зоне Таласо-Ферганского разлома.

Таблица 1

**Времена пробега продольной волны  
на сейсмостанциях Сасыкты, Карасу, Кодуль, Торкент**

Годы	Станции			
	Сасыкты	Карасу	Кодуль	Торкент
1975			3,10	2,10
1976		5,73		2,40
1977		5,54	3,30	2,20
1978		5,70	3,50	2,40
1979	3,10	5,50	3,40	2,10
1980	3,37	5,90	3,50	2,40
1982	3,45	6,50	3,30	2,50
1983	3,20	5,90	3,55	2,20
1984	3,10	6,20	3,30	
1985	3,34	6,30	3,43	2,40

Таблица 2

**Логарифмы амплитуд первой фазы продольной волны  
на станциях наблюдения**

Годы	Времена пробега t (сек)			
	Сасыкты	Карасу	Кодуль	Торкент
1974			9,850	
1975			9,852	11,397
1976			9,857	11,397
1977		7,244	9,847	11,395
1978		7,230	9,853	11,381
1979	9,110	7,233	9,847	11,395
1980	9,107	7,210	9,841	11,368
1982	9,086	7,210	9,835	11,360
1983	9,110	7,207	9,840	11,370
1984	9,045	7,214	9,850	
1985	9,05	7,214	9,86	11,370

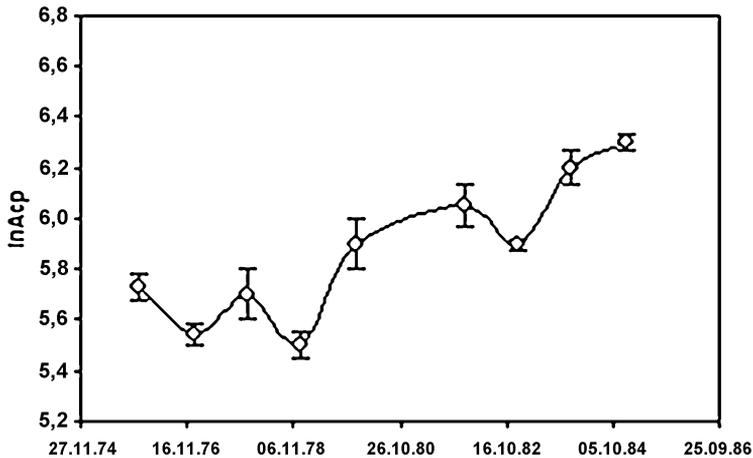


Рис. 3. Изменение амплитуды первой фазы продольной волны с/с Карасу за 1974–1985 гг.

### **Регулярное сейсмическое просвечивание среды, содержащей Таласо-Ферганский разлом при использовании ядерных взрывов (сравнительно большие глубины)**

Для определения влияния Таласо-Ферганского разлома на параметры сейсмических волн и их временных вариациях проанализированы и сопоставлены записи на сейсмических станциях, расположенных до разлома, когда сейсмические лучи не пересекают разлом (станции Манас и Арал) и станциях, расположенных после разлома, когда сейсмические лучи в зоне выхода пересекают разлом (станции Арсланбоб и Суфикурган).

Обработаны аналоговые сейсмограммы с записями ядерных взрывов, производимых на площадке Балапан, с магнитудой 5,5–6,2 в течение 1970–1989 гг. Станции Манас и Арал находятся на эпицентральной расстоянии 960–970 км от полигона и на расстояниях 50 и 90 км соответственно от разлома. Станции Арсланбоб и Суфикурган удалены от полигона на 1070 и 1180 км, а от разлома на 30 и 130 км соответственно.

Методика обработки и анализа материала состояла из следующих этапов:

1. Измерение максимальных амплитуд и их периодов в группе продольных и поперечных волн Pn, P\*, Pg, Poc, Sn, S\*, Sg, Lg, то есть в волнах, чей путь лежит в разных глубинных слоях земной коры и мантии. Параметром, характеризующим динамику сейсмических волн, была выбрана амплитуда максимальной фазы, так как эта фаза достаточно хорошо соответствует максимуму спектра колебаний и наиболее устойчива по сравнению с другими фазами к изменениям частотной характеристики аппаратуры.

2. Вычисление отношений амплитуд разных волн, как продольных, так и поперечных.

Известно, что относительные параметры меньше подвержены вариациям условий взрыва. Кроме того, они характеризуют форму записи, и сопоставление их для разных станций поможет выявить вариации параметров, связанные с влиянием разлома.

3. Построение временных рядов параметров за 1970–1989 гг. для оценки вариаций напряженного состояния пород земной коры и мантии.

В табл. 3 приведены кажущиеся скорости пробега всех типов волн на станциях Манас, Арал, Арсланбоб и Суфикурган. В табл. 4 – величины относительных параметров.

Таблица 3

**Кажущаяся скорость пробега основных групп продольных, поперечных и Lg волн на станциях Манас, Арал, Арсланбоб, Суфикурган**

Станции	$\Delta$ , км	$Pn_1$	$Pn_2$	$P^*$	$Pg_1$	$Pg_2$	Рос	$Sn$	$S^*$	$Sg$	$Lg_1$	$Lg_2$
Манас	960–980	7,7		6,9		6,0		4,5	4,3	4,0	3,8	3,5
Арал	960–980	7,6		7,2		6,0	5,0	4,4–4,5	4,2–4,3	4,0	3,8	3,3–3,5
Арсланбоб	1050–1070	7,7	7,4	7,0	6,5	6,0		4,5	4,3	4,0		3,5
Суфикурган	1170	7,7		7,12		6,2	5,4	4,5		4,0	3,5	3,3

Таблица 4

**Средние значения относительных параметров и их дисперсии на станциях Манас, Арал, Арсланбоб, Суфикурган**

Станции	$P^*/Pn$	$Pg/Pn$	Рос/Pn	$Sn/Pn$	$S^*/Pn$	$Sg/Pn$	$Lg/Pn$
Манас	1,28	1,15		1,33	3,25	3,74	9,23
$\sigma$	$\pm 0,11$	$\pm 0,07$		$\pm 0,11$	$\pm 0,30$	$\pm 0,31$	$\pm 1,03$
Арал	2,09	1,9	2,52	2,61	3,0	4,90	27,5
$\sigma$	$\pm 0,10$	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$	$\pm 0,10$	$\pm 0,13$	$\pm 0,38$	2,75
Арсланбоб	6,02	9,0		15,77	23,46	28,18	69,80
$\sigma$	$\pm 0,33$	$\pm 0,50$		$\pm 1,3$	$\pm 3,4$	$\pm 3,4$	3,5
Суфикурган	0,94	1,4		1,35		2,79	8,60
$\sigma$	$\pm 0,16$	$\pm 0,20$		$\pm 0,18$		$\pm 0,34$	$\pm 0,61$

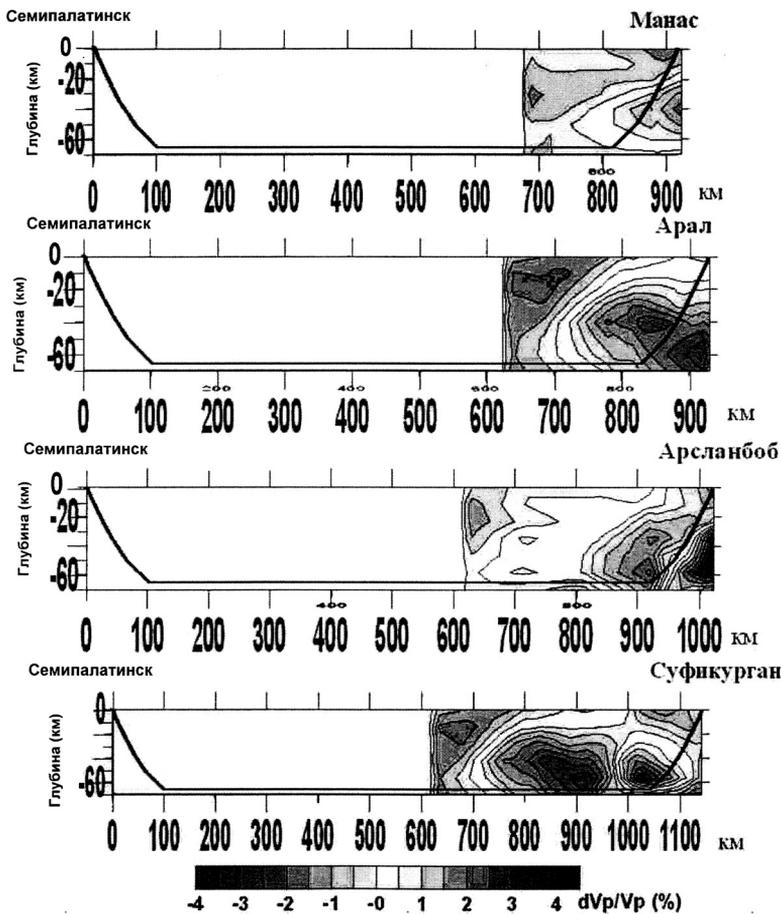
Анализ всех данных, приведенных в таблицах, позволяет сделать следующие выводы:

1. На записях всех станций выделены волны, связанные с основными границами в земной коре и верхней мантии, причем в группе продольных волн вступления всех волн более четкие, чем в группе поперечных волн. Но каждая станция имеет свои особенности по скоростям и по количеству выделенных волн. На станции Манас выделяются очень четко три группы продольных и поперечных волн  $Pn$ ,  $P^*$ ,  $Pg$ ,  $Sn$ ,  $S^*$ ,  $Sg$ ,  $Lg$ . На станции Арал кроме этих волн выделяется волна Рос – рефрагированная в слое осадков, которая на этой станции является самой интенсивной в группе Р волн. Эта волна выделяется также на станции Суфикурган. На других станциях эту волну выделить не удастся. Таким образом, на станциях Арал и Суфикурган, наиболее удаленных от разлома (90 и 130 км), четко выделяется волна, связанная со слоем осадков, по-видимому, менее нарушенном, чем вблизи разлома.

2. На записях станции Арсланбоб по сравнению с другими станциями в группе продольных волн появляются две достаточно интенсивные волны  $Pn_2$  и  $Pg_2$  со скоростями 7,4 и 6,5 км/сек соответственно. При этом амплитуда первой волны  $Pn_1$  по сравнению с другими волнами имеет очень малую амплитуду, и соотношения дру-

гих волн к волне  $Pn_1$  на станции Арсланбоб превышают примерно в 5–10 раз эти значения на станциях Манас, Арал и Суфикурган (табл. 4).

Появление волн  $Pn_2$  и  $Pg_1$ , можно объяснить наличием резкой отражающей границы в зоне разлома. Это предположение подтверждается сопоставлением скоростных разрезов в зонах выхода сейсмических лучей. На рис. 4 показаны вертикальные сечения трехмерной скоростной модели на профилях Семипалатинский полигон – сейсмическая станция и наложенные на эти сечения сейсмические лучи, преломляющиеся на границе 60 км. [Усольцева, 2004]. Из рис. 4 видно различие скоростных разрезов в зоне выхода лучей на разных станциях. На станции Арсланбоб сейсмический луч проходит по резкой, наклоненной на северо-восток, границе низкоскоростных и высокоскоростных слоев, возможно являющейся частью разлома. На других станциях подобные границы не наблюдаются и лучи проходят по среде с чередованием низкоскоростных и высокоскоростных слоев. На станции Манас в верхней части разреза сейсмический луч проходит в высокоскоростных породах, чем и объясняются интенсивные и четкие вступления всех волн.



**Рис. 4.** Вертикальные сечения трехмерной скоростной модели вдоль профилей Семипалатинск – сейсмическая станция, наложенные на эти сечения сейсмические лучи, преломляющиеся на границе 60 км

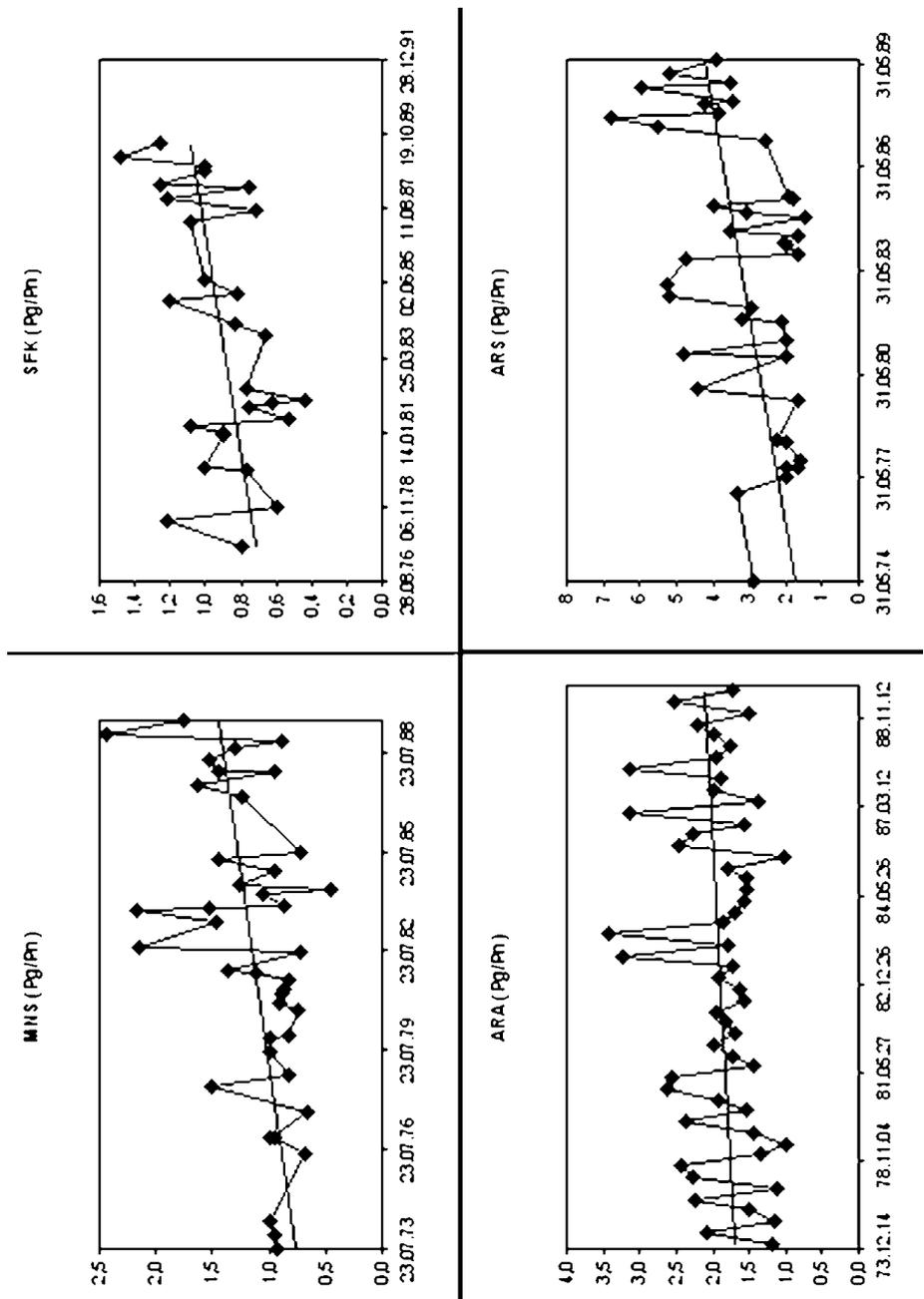


Рис. 5. Временные ряды за 1973–1989 гг. параметра Pg/Pn для станций Манас, Арал, Арсланбоб, Суфигурган

Построены временные ряды относительных параметров (рис. 5) для группы продольных и поперечных волн за 1970–1989 гг. Анализ их показал, что на станциях Манас, Арал, Суфикурган большинство параметров имеют незначимый линейный тренд и только на станции Арсланбоб этот тренд является значимым. На рис. 5 приведены ряды относительного параметра  $P_g/P_n$  для всех станций. Видно, что наибольший положительный тренд наблюдается на станции Арсланбоб. Это хорошо согласуется с положительным трендом временного ряда скорости пробега продольной волны на станции Арсланбоб в этом же временном интервале [Гамбурцева и др., 2006].

На станции Манас при незначительном общем линейном тренде наблюдается четырехкратное уменьшение амплитуд с 1983 до 1984 гг. В этот интервал времени, как показано в работе [Гамбурцева и др., 2006], наблюдалось повышение сейсмической активности, количество землетрясений в этом регионе выросло от 30 до 220.

### Выводы

В результате сопоставительного анализа сейсмических записей на станциях, расположенных вдали от Таласо-Ферганского разлома, и на станциях в зоне его влияния, получены следующие результаты.

1. На двух станциях, расположенных в зоне влияния разлома Арсланбоб и Карасу получены значимые вариации кинематических и динамических параметров, которые могут свидетельствовать об изменениях во времени поля напряжений более активных верхних слоев земной коры. По данным станции Карасу эти изменения относятся к верхнему двухкилометровому слою земной коры.

2. На станции Арсланбоб, расположенной в 30 км от разлома наблюдается усложнение формы записи по сравнению с другими станциями, особенно в группе продольных волн. При распространении волн через разлом ослабевает первая продольная волна, и появляются интенсивные волны, возможно связанные с вышележащими границами, в том числе в разломной зоне. Амплитуда волны  $L_g$  на станции Арсланбоб в 2–3 раза превосходит амплитуду этой волны на станциях, расположенных вдали от разлома. Широкополосные спектры всех волн могут говорить об их интерференционном характере. Временные вариации относительных параметров более значимы по сравнению с другими станциями.

3. Можно сделать вывод о том, что зона влияния Таласо-Ферганского разлома на сейсмические волны может достигать 30 км.

### Литература

Гамбурцев А.Г., Кондратьев О.К., Максаков В.С. Опыт выделения отраженных волн от разломов в сейсмоактивных районах. Сейсмические волновые поля в зонах разлома. М.: Наука. 1978. С. 145–154.

Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. М.: Наука 1992.

Гамбурцева, Т.М. Сабитова, Д.Д. Султанов, И.А. Санина, О.П. Кузнецов, И.В. Волкова, О.А. Усольцева. Геодинамические процессы в сейсмоактивных районах Тянь-Шаня по данным мониторинга с использованием ядерных взрывов. Физика Земли. 2006. N4. С. 3–13.

*Добровольский И.П., Долбилкина Н.А., Преображенский В.Б., Фридман В.Н.* Сейсмическое просвечивание в районе Токтогульского водохранилища (полевые наблюдения и теоретический расчет). // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, № 2, 1981. С. 05–99.

*Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: «Академкнига», 2003. 423 с.

Сейсмические волновые поля в зонах разлома. М.: Наука. 1978.

Сейсмическое просвечивание очаговых зон. М.: Наука. 1983.

Сейсмический мониторинг земной коры. М.: Наука. 1986.

*Султанов Д.Д., Люкэ Е.И., Кузнецов О.П.* Результаты сейсмических измерений в дальней зоне при взрыве на реке Бурлыкя. // Взрывная техника в строительстве и мелиорации: сб. статей. М.: Недра. 1982. С. 38–50.

*Усольцева О.А.* Трехмерные скоростные модели земной коры Тянь-Шаня на основе би-сплайн параметризации и триангуляции Делоне, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИДГ РАН, Москва, 2004.