

С. В. ВАРДЗЕЛЯН, С. Ц. АКОПЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТЕЙ Р-ВОЛН ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ДЖАВАХЕТСКОГО НАГОРЬЯ

По записям сейсмостанций Кавказа «Ахалкалаки», «Бакуриани», «Богдановка» и «Степанаван» исследованы вариации скоростей Р-волн за период с 1974 по 1979 годы, охватывающий Дманисское землетрясение от 2 января 1978 года. Надежно выявлены два аномальных периода продолжительностью $\sim 0,8—0,9$ года. Оба аномальных периода интерпретированы как предвестники, связанные с подготовками землетрясений с магнитудами $M \geq 5$ Джавахетского нагорья и его окрестностей, проявляющихся за 1,5—2 года до толчка.

Введение

Вариации скоростей сейсмических волн и их отношений, связанных с подготовкой землетрясений разной силы, выявлены на многих сейсмоактивных регионах [3, 7, 10, 12, 13]. Наиболее существенные временные изменения имеют скорости продольных волн V_p . Аномальный период вариации скоростей длится от одного до нескольких месяцев перед землетрясением и пропорционально магнитуде предваряющего землетрясения. Многочисленные лабораторные эксперименты по испытанию образцов на сжатие и трещинообразование показали существование эффекта уменьшения V_p [4, 5].

Физическое объяснение этих явлений находится на уровне модельных представлений механики очагов землетрясений [5, 11].

Возможность использования метода невязок первых вступлений продольной Р-волны [1] с целью выявления изменений V_p перед землетрясениями Кавказа впервые рассмотрена в работе [2]. На данных записей сейсмостанции «Горис» было анализировано изменение невязок за период с 1964 по 1973 гг. Было выявлено аномальное поведение скоростей за 1,5 года перед Зангезурским землетрясением 9 июня 1968 года.

В данной работе исследованы вариации скоростей Р-волн по записям четырех сейсмостанций Джавахетского нагорья за период с 1974 по 1979 гг., с целью более надежного выявления временных и пространственных изменений V_p перед Дманисским землетрясением от 2 января 1978 года, с магнитудой $M=5,3$.

В результате исследований перед этим землетрясением выявлены два аномальных периода вариаций скоростей V_p . Оказалось, что более долгосрочные вариации скоростей не связаны с подготовкой Дманисского землетрясения и их можно интерпретировать в связи с подготовкой двух землетрясений с $M=5$, происшедших в 1974 году юго-западнее Джавахетского нагорья.

1. Методика и результаты расчетов

Временные изменения невязок первых вступлений Р-волн исследованы на 4 сейсмостанциях Кавказа: «Ахалкалаки»—АХЛ, «Бакуриани»—БКР, «Богдановка»—БГД, «Степанаван»—СТП. Схема расположения этих станций приведена на рис. 1. Станция БКР опорная, а все остальные входят в региональную сеть. Эти станции функционируют более 30 лет и там имеются непрерывные регистрации землетрясений в интересующем нас интервале времени. Выбор нескольких близких сейсмостанций обусловлен необходимостью независимого выявления аномалий скоростей V_p перед землетрясениями, что несомненно повышает значимость полученных результатов.

Расчеты проводились по методу временных невязок Р-волны, описанных в работах [1, 2]. Выбор годографа и статистическое оценивание проводились аналогично работе [2]. Для расчетов были использо-



Рис. 1. Схема расположения сейсмостанций и эпицентров землетрясений: ▲ — сейсмостанция, ○ — эпицентр землетрясения.

ваны данные о землетрясениях, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях $20 \text{ км} < \Delta \leq 500 \text{ км}$, энергетический класс которых $K \geq 7$. Причем сделаны следующие ограничения на выборку:

а) в исследование включились землетрясения, записанные минимум на трех сейсмостанциях;

б) были использованы только невязки $|R(t)| < 3 \text{ с}$, чтобы исключить грубые ошибки интерпретации первых вступлений.

Таким образом рассчитаны невязки 7524 регистраций, число которых распределено равномерно по сейсмостанциям (в среднем приходится 320 наблюдений в год на каждую станцию). В табл. 1 приведены данные о количестве невязок и средние значения невязок (станционные средние) для каждой станции за исследуемый период.

Отрицательные значения станционных средних в целом указывают на повышение значения скоростей V_p Джавахетского нагорья по сравнению с средне-кавказским значением, что в целом согласуется с результатами работы [6].

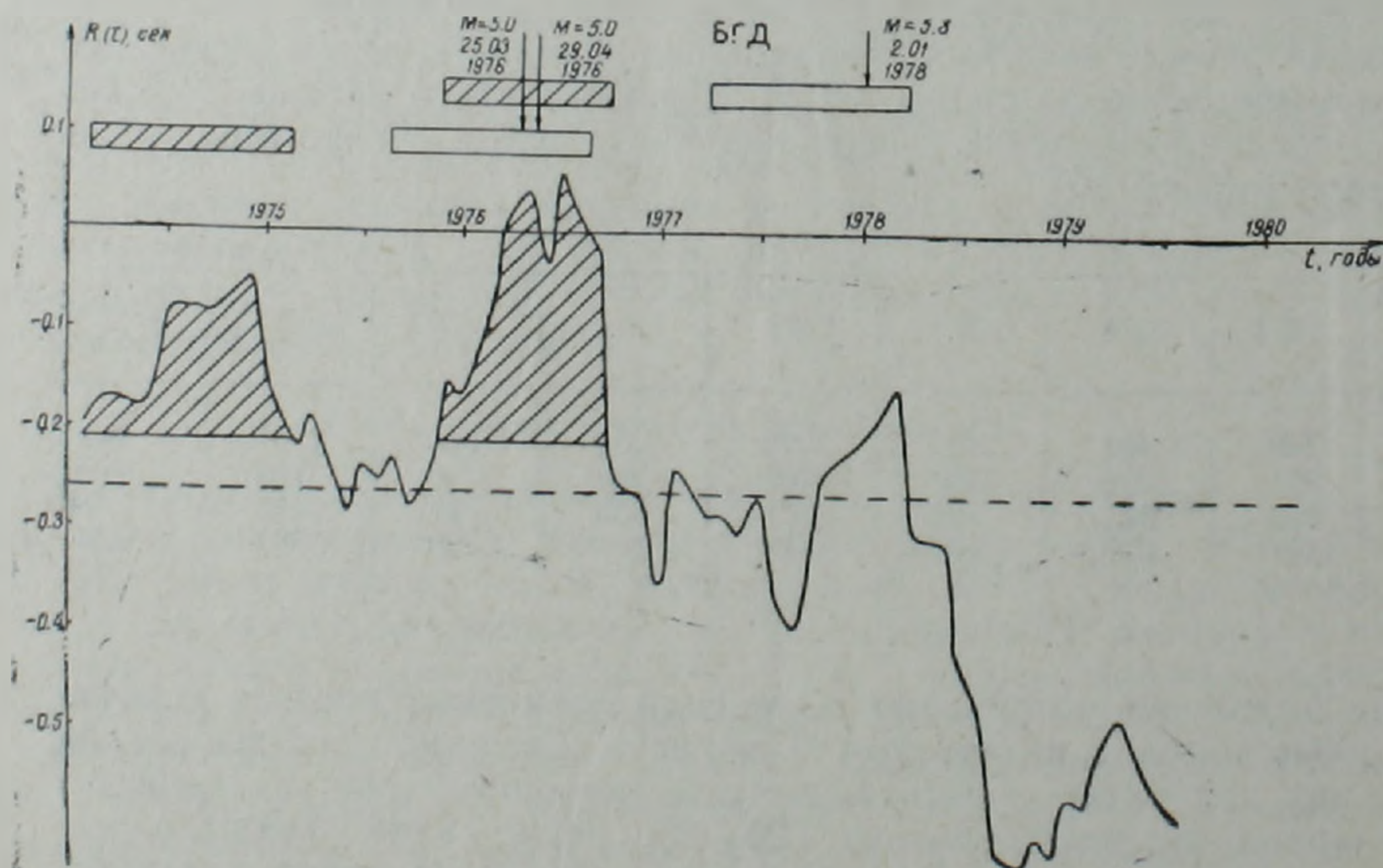
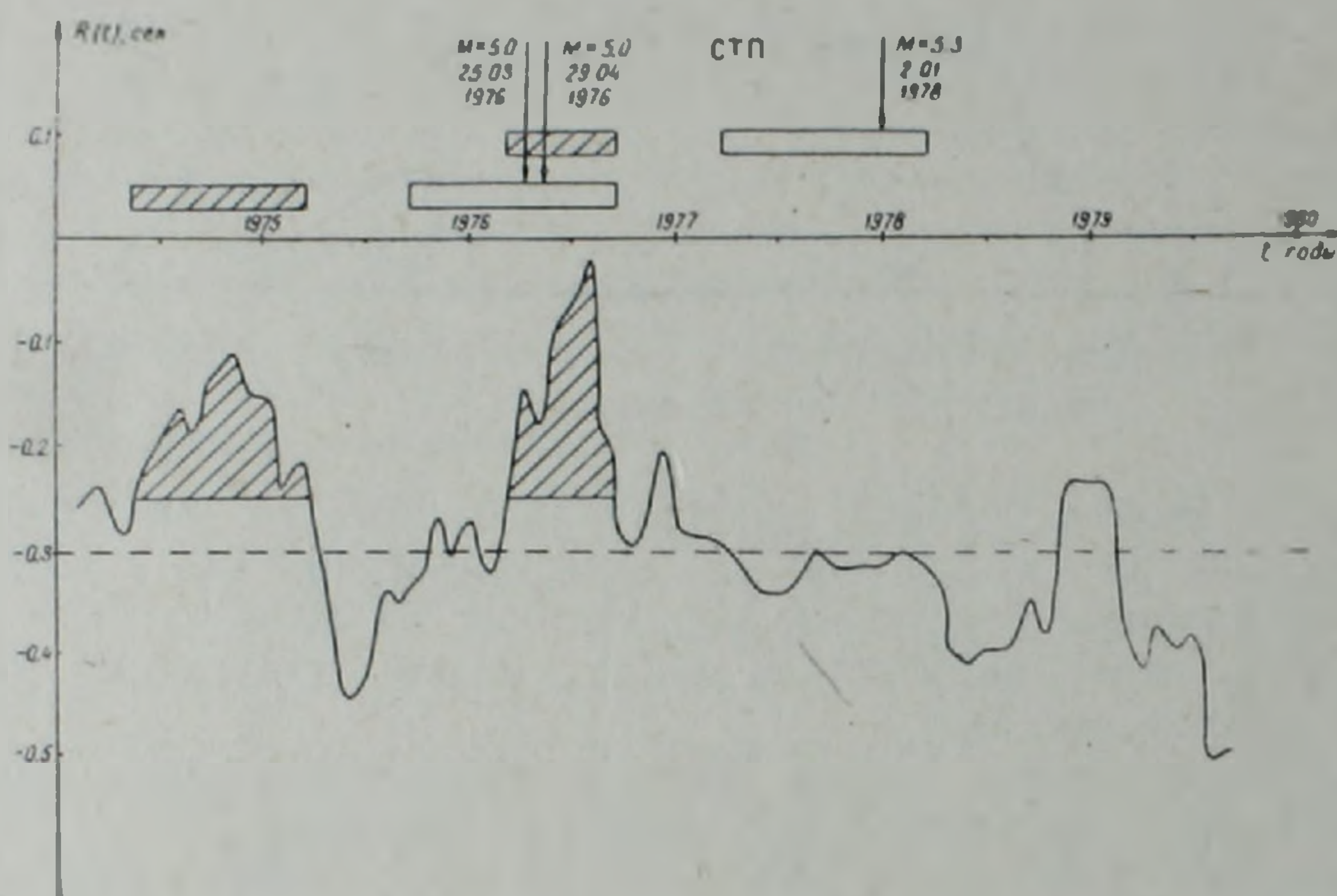
Таблица 1

Код станции	1974	1975	1976	1977	1978	1979	Сумма невязок	Станц. средн.
СТП	289	302	354	349	356	297	1947	—0.305
БГД	301	306	300	262	283	298	1758	—0.26
АХЛ	320	321	352	351	355	327	2026	—0.24
БХР	331	297	286	315	205	299	1793	—0.14

Для выявления устойчивых изменений временных невязок сглаживание проводилось с интервалом 6 месяцев. Графики построены для скользящих полугодических интервалов с окном один месяц. Каждый такой интервал содержит невязки 120—200 регистраций. Таким осреднением приведены к минимуму разбросы ошибок во время интерпретации первых вступлений Р-волн. Рассчитанные среднеполугодические невязки для каждой станции представлены на рис. 2а, б, в, г. На этих

графиках увеличению невязок от средне-станционных значений, обозначенных пунктирами, соответствуют уменьшения скоростей и наоборот. На рис. 3 представлены суммарные по всем четырем станциям значения изменений среднеполугодовых невязок (суммарные невязки $\bar{R}_2(t)$). Это наглядно показывает картину изменения скоростей в зоне подготовки землетрясения. Таким образом, устраняются локальные скоростные неоднородности под станциями. Стандартные отклонения невязок от среднего значения на отдельных станциях изменяются от 0,06 до 0,1 с. Для суммарных невязок стандартное отклонение обычно имеет устойчивое значение, равное 0,05 с.

Значение невязок будем считать аномальным, если отклонение от станционного среднего превышает 0,05 с. Такое пороговое значение принимаем и для анализа суммарных невязок для каждой отдельной сейсмостанции.



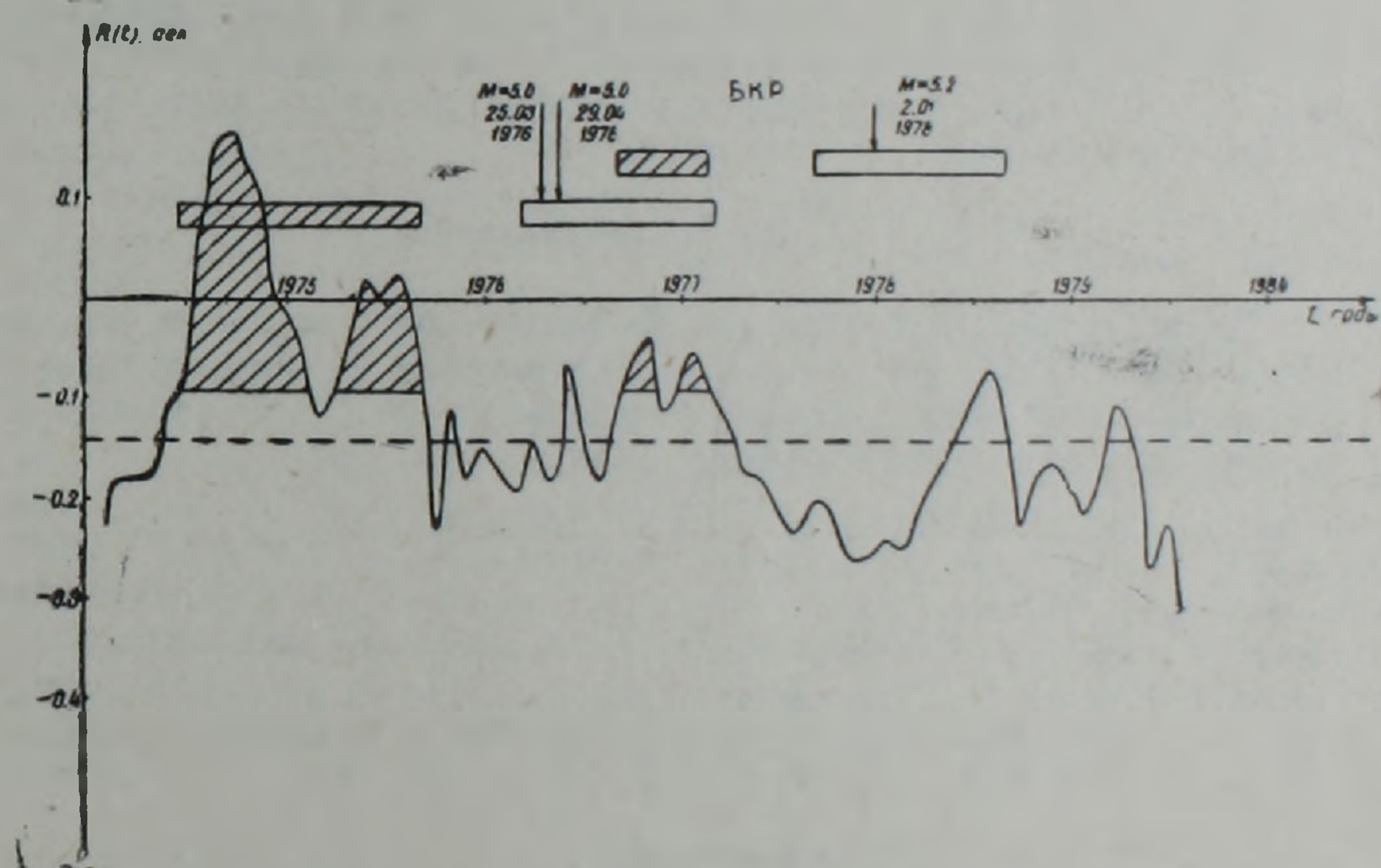
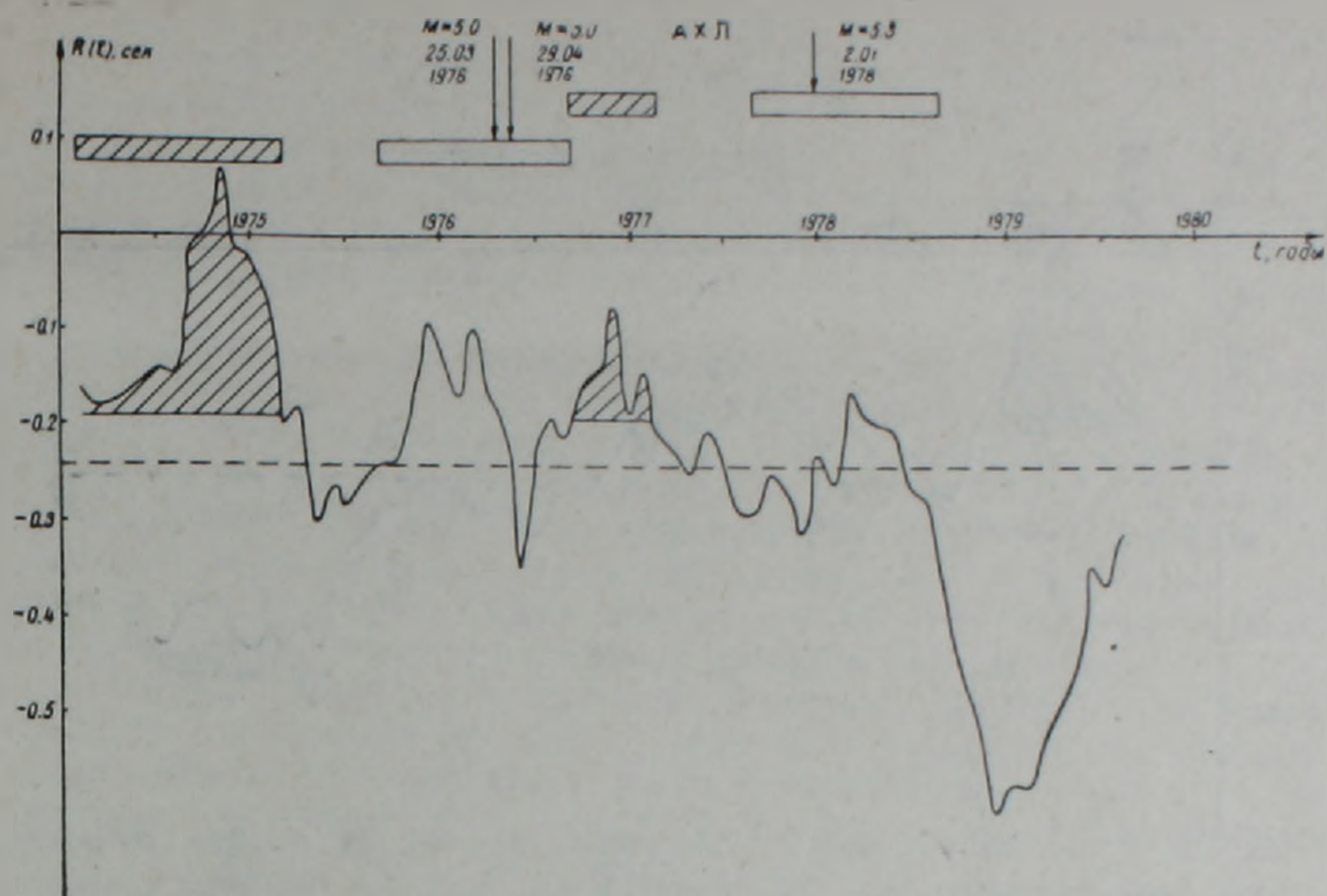


Рис. 2. Изменения средних полугодовых невязок на сейсмостанциях: а) СТП, б) БГД, в) АХЛ, г) БКР. Аномальные периоды скоростей заштрихованы, стрелкой обозначено время землетрясения.

Наша задача—выделение аномальных периодов увеличения невязок (они на рисунках заштрихованы). Как видно из рис. 3, за весь период наблюдаются два таких участка превышающих станционное среднее с мая 1974 по февраль 1975 и с февраля 1976 по январь 1977, с амплитудами аномалий 0,2 и 0,1 с соответственно.

Аналогичная картина наблюдается и на отдельных сейсмостанциях (заштрихованные участки на рис. 2 а, б, в, г). Для сейсмостанций СТП и БКР наблюдается хорошая корреляция невязок. На станции АХЛ (рис. 2в), между двумя заштрихованными аномальными участка-

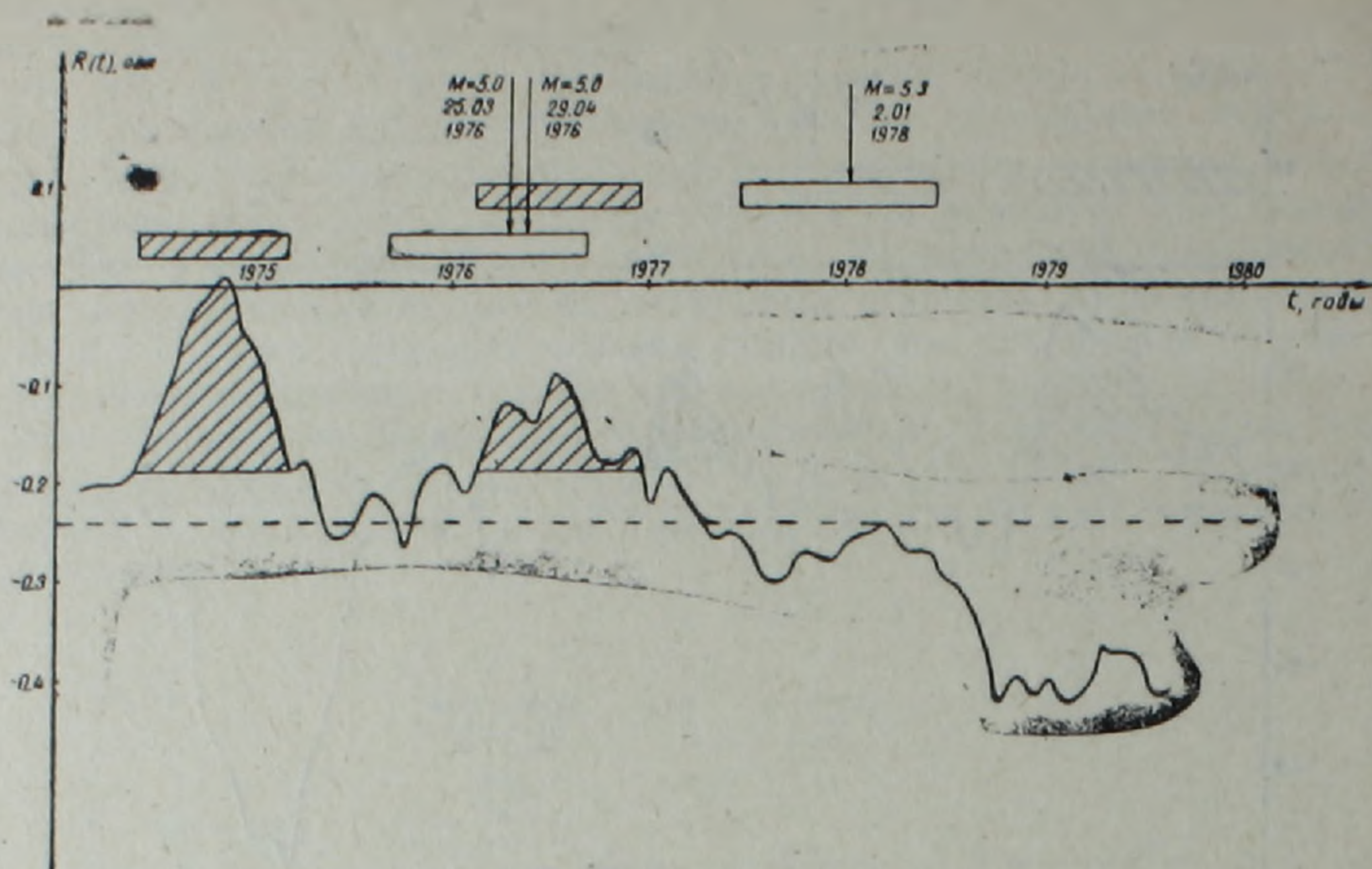


Рис. 3. Изменение суммарных полугодовых невязок на четырех сейсмостанциях. Аномальные периоды скоростей заштрихованы. Стрелкой обозначены времена землетрясений.

ми, выделяется третий участок. На станции БКР (рис. 2г) наблюдаемая картина более сложна, аномальные участки расчленяются. На первом участке аномальный период расширяется, кроме того тут имеется и наибольшая амплитуда средних невязок.

2. Анализ результатов

За исследуемый период на Джавахетском нагорье и его окрестностях произошли три сильных землетрясения с магнитудами $M \geq 5$. Эпицентры этих землетрясений показаны на рис. 1. В таблице 2 приведены данные об этих землетрясениях.

Таблица 2

№ № п/п	Дата			M	Примечание
1	25.03.1976	41.0	43.0	5.0	Турция
2	29.04.1976	40.9	42.8	5.0	Турция
3	2.01.1978	41.4	44.1	5.3	Дманиси

На рис. 2 а-г стрелками показаны моменты возникновения этих землетрясений. Расстояние между эпицентрами и станциями порядка 45÷120 км. Радиус зоны проявления предвестников оценивается по формуле [9], $r = 10^{0.43 M}$, из которого получаем для землетрясения с $M = 5.0$: $r = 141$ км, а с $M = 5.3$ — $r = 190$ км. По радиусу зоны проявления предвестников все сейсмостанции входят в зону подготовки землетрясений (табл. 2). Горизонтальный размер объема неоднородной трещиноватости, ответственной за аномалию сейсмоскоростей, находится в пределах r , а форма зависит от протяженности очага и анизотропных свойств среды. О вертикальных размерах трещиноватой области можно судить по глубинам сейсмогенных разрывов. Глубину тектонического разлома можно оценить по значениям дисперсии групповых и фазовых скоростей прямых и отраженных волн. В центральной части Джавахетского нагорья по наблюдениям затуханий разных групп волн Лява в зависимости от глубины, выделяется разлом с глубиной залегания ~ 30 км [8]. Вертикальные размеры сейсмогенных разломов можно оценить

также и по глубинам очагов землетрясений, которые на Джавахетском нагорье достигают 20—25 км [8].

Анализ выявленных нами временных аномалий на сейсмостанциях нагорья указывает о размерах процессов подготовки землетрясения. Как видно из рис. 3, аномальный период изменения скоростей (заштрихованные области), продолжительностью $\sim 0,8 \div 0,9$ года, начинается за 1,5—2 года до землетрясения, затем наблюдается восстановление скоростей близ уровня станционного среднего. Такая картина находится в согласии с существующими моделями подготовки землетрясения.

Отметим, что на первый прогнозируемый период продолжительностью год, приходится и Черногорское землетрясение (28.07.1976 г., $M=6,2$), подготовка которого тоже может влиять на первый аномальный период. На первый аномальный период может сказываться и зона подготовки Ванского землетрясения (24.11.1976 г., $M=7,0$). Исследование числа прогнозируемых землетрясений и их магнитуды нами не проведено. Для этого нужно иметь большой статистический материал и исследовать форму и амплитуду аномального периода.

Первый выявленный аномальный период интерпретируем как предвестник 1 и 2 землетрясения из табл. 2, которые условно считаем как одно событие. Второй аномальный период интерпретируем как предвестник 3-го землетрясения из табл. 2. Подобная картина наблюдается и на отдельных сейсмостанциях рис. 2 а-г.

На основе полученных результатов дадим вариант формального алгоритма прогноза с использованием невязок первых вступлений Р-волн. Аномальный период понижения сейсмоскоростей $\lesssim 0,9$ года (на рисунках отмечены заштрихованными полосками) объявляется прогнозируемый период землетрясений с $M \geq 5$. Продолжительность времени ожидаемого землетрясения порядка одного года (незаштрихованные полоски).

Отметим некоторые особенности, вытекающие из детального анализа рис. 2,3. Идентичность поведения среднеполугодовых невязок на сейсмостанциях СТП и БГД (рис. 2 а, б) указывает на сходство строения земной коры под этими станциями. Несколько отличная картина аномальных периодов наблюдается на сейсмостанциях АХЛ и БКР (их раздвоение см. на рис. 2 в, г). Не исключено влияние особенностей строения земной коры под этими станциями. Усреднением невязок по всем станциям мы устраняем влияние этих локальных особенностей аномальных периодов и увеличиваем надежность полученных результатов.

Устойчивость среднеполугодовых невязок, конечно, зависит от пространственного распределения статистической выборки сейсмических источников, что позволит в дальнейшем изучить азимутальные неоднородности процессов подготовки землетрясений.

Заключение

Исследование невязок вступления скоростей Р-волн на сейсмостанциях АХЛ, БКР, БГД и СТП за период с 1974 по 1979 гг. позволило надежно выделить два аномальных прогностических периода продолжительностью $\sim 0,8 \div 0,9$ года. В соответствии с моделями процессов подготовки землетрясения и физики очага, аномальные периоды интерпретированы как долгосрочные предвестники землетрясений. Они выделяются за 1,5—2 года до землетрясений с магнитудами $M \geq 5$.

Усреднение невязок по всем станциям позволяет надежно выявить временные аномалии скоростей с устранением локальных особенностей структуры под станциями. Аномалии, наблюдаемые на отдельных сейсмостанциях, могут дать информацию о пространственных неоднородностях процессов подготовки землетрясений.

Для предсказания силы и места подготавливаемого землетрясения (или землетрясений) описываемым методом, необходимо накопить

большой статистический материал и на этой основе исследовать амплитуды аномальных периодов и их продолжительность.

Институт геофизики
и инженерной сейсмологии
АН АрмССР

Поступила 12.III.1987.

Ս. Վ. ՎԱՐԶԵԼՅԱՆ, Ս. Յ. ՀԱԿՈՅԱՆ

ԶԱՎԱԽԻ ԼՆՌԱՇՆԱՐԶԻ, ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԵՐԻՑ ԱՌԱՋ P-ԱՎԻՔՆԵՐԻ
ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Կովկասի «Ախալքալակ», «Բակուրիանի», «Բոգդանովկա», «Ստեփանավան» սեյսմիկ կայանների գրանցումների տվյալներով հետազոտված են սեյսմիկ P-ալիքի միջին արագությունների փոփոխությունները 1974—1979 թթ. ընթացքում, ընդգրկելով 1978 թ. հունվարի 2-ի Դմանիսի ուժեղ երկրաշարժը: Կառուցված և քննարկված են արագությունների փոփոխությունների գրաֆիկները նշված բոլոր կայանների համար առանձին-առանձին, միաժամանակ նաև՝ բոլոր կայանները միասին վերցված: Հուսալիորեն առանձնացվում են երկու ոչ նորմալ պարբերություն՝ մոտավորապես 0,8—0,9 տարվա տևողությամբ: Այդ ոչ նորմալ պարբերությունները մեկնաբանվում են որպես կանխանշաններ՝ կապված Ջավախքի լեռնաշխարհի և նրա շրջակայքի $M \geq 5$ մագնիտուդայով երկրաշարժերի հետ, դրսևորվելով զրնգումից 1,5—2 տարի առաջ: Ստացված արդյունքների հիման վրա առաջադրված է երկրաշարժերի երկարաժամկետ կանխագուշակման ձևական շափանիշ:

S. V. VARDZELIAN, S. Ts. HAKOPIAN

THE P-WAVES VELOCITIES CHANGES INVESTIGATION BEFORE
THE EARTHQUAKES IN THE DJAVAKHK HIGHLAND

A b s t r a c t

By the Caucasus „Akhalkalaki“, „Bakuriani“, „Bogdanovka“ and „Stepanavan“ seismic stations records the P-waves velocities variations are investigated during 1974--1979, including the Dmanisi earthquake in 2 January, 1978. Two anomalous periods of about 0,8—0,9 years duration are safely revealed. Both anomalous periods are interpreted as precursors, connected with the Djavakhk highland and its environs $M \geq 5$ earthquakes preparation, which reveal some 1,5—2 years before the shock.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арнольд Э. П., Прозоров А. Г. О возможности использования невязок вступления волн Р для прогноза землетрясений — Докл. АН СССР, 1975, 24, № 6, с. 1308—1311.
2. Вардзелян С. В. Временные изменения невязок Р-волны перед Зангезурским землетрясением 1968 года — Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, 1985, № 4, с. 73—77.
3. Долбилкина Н. А., Мячкин В. И. Вариации времен пробега продольных сейсмических волн в фокальной зоне у берегов Камчатки — В кн.: Сейсмическое просвечивание очаговых зон. М.: Наука, 1976.

4. Касахара К. Механика землетрясения. М.: Мир, 1984, с. 158—161.
5. Мячкин В. И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978.
6. Славина Л. Б., Пивоварова Н. Б. Методика расчета и построения трехмерных полей скоростей в фокальных зонах по сейсмическим данным (на примере Кавказа).—В кн.: Интерпретация сейсмических наблюдений. М.: Радио, 1982, с. 17—30.
7. Семенов А. Н. Изменения отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сильными землетрясениями.—Изв. АН СССР, Физика Земли, 1969 № 4, с.
8. Строев, напряженно-деформационное состояние и условия сейсмичности литосферы Малого Кавказа. Тбилиси: Мецниереба, 1983.
9. Экспериментальная сейсмология М.: Наука, 1983, с. 23—24.
10. Aggarwal Y. P., Sykes L. R., Ambruster J., Sbar M. L. Premonitory changes in seismic velocity and earthquake prediction.—Nature, 1973, 241, № 5385, pp. 101—104.
11. Scholz C. H., Sykes L. R., Aggarwal Y. P. Earthquake prediction: A physical basis —Science, 1973, 181, pp. 803—810.
12. Whitcomb J. H., Garmany T. D., Andersen D. L. Earthquake prediction: variation of seismic velocities before the San Fernando earthquake.—Science. 1973, 180, № 4086, pp. 632—635.
13. Wiss M., Johnston A. C. A search for teleseismic P-residuals changes before large earthquakes in New Zealand.—J. Geophys. Res., 1974, 79, № 23, pp. 3283—3290.