

**ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГОАКТИВНЫЕ ТОЧКИ ЗЕМЛИ (ЯВЛЕНИЕ ВЭТ):
КЛЮЧ К ДАЛЬНЕЙШЕМУ ПОНИМАНИЮ ФИЗИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ?**

С.Ю. Баласанян

Армянская ассоциация сейсмологии и физики Земли, 375010, Ереван, ул. Вардананц, 13, Армения

Исследуя с 1972 г. различные динамические и нелинейные явления, автором был сделан вывод о том, что выбор пунктов наблюдения является ключевым вопросом в дальнейшем понимании протекающих геодинамических процессов и связанных с ними явлений, в частности таких, как землетрясения. Исследуя специфические особенности литосферы как многофазной, полидисперсной, гетерогенной системы, автором было установлено, что зоны, характеризующиеся пересечением глубоко проникающих (до мантии) активных разломов, являются наиболее гетерогенными зонами литосферы, имеющими особые нелинейные и динамические физические свойства. Этим зонам свойственна наибольшая концентрация упругих деформаций. Последнее делает их наиболее термодинамически неустойчивыми элементами геологической среды и, соответственно, наиболее чувствительными к внешним физическим воздействиям различной физической природы. В сейсмоактивных зонах доминантой внешних воздействий являются региональные силы упругих напряжений. Ввиду аномально высокой способности к накоплению, перераспределению и выделению различных видов энергии, высокочувствительные локальные зоны литосферы были названы энергоактивными точками Земли, а само явление — явлением высокочувствительных энергоактивных точек Земли — явлением ВЭТ. Исследуя явление ВЭТ в уникальной энергоактивной точке Каджаран, расположенной на юге Армении, было установлено, что независимо от расстояния между точкой наблюдения и эпицентрами сильных землетрясений каждое сейсмическое событие в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит сопровождается эффектом сжатия энергоактивной точки.

Литосфера, землетрясения, энергоактивная точка, Армения.

**SENSITIVE ENERGY ACTIVE POINTS (SEAP): A CLUE TO BETTER UNDERSTANDING
OF EARTHQUAKE PHYSICS?**

S.Yu. Balassanian

Choice of observation sites is of key importance for understanding geodynamic processes and related phenomena, especially earthquakes, as it has been found out through three decades of investigation into preseismic, coseismic, and postseismic dynamic and nonlinear effects. Junctions of translithospheric active faults are extremely heterogeneous zones in the multiphase polydisperse system of the lithosphere. These zones, marked by specific nonlinear and dynamic properties, build up the greatest elastic strain and are thus the least stable thermodynamic elements highly sensitive to external physical effects, mainly associated with regional stress variations. The sensitive local lithospheric zones with their ability to accumulate, redistribute, and release various types of energy were called sensitive energy active points (SEAP). Monitoring at the Kajaran SEAP station in an active seismic region of southern Armenia showed compression effects related to all earthquakes within the Arabia/Eurasia collision zone, irrespective of their epicentral distances.

Lithosphere, earthquake, energy active point, Armenia

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмологические исследования Земли в XX в. благодаря принципиально новой возможности, открывшейся в связи с использованием современных сейсмических станций, установленных по всему миру, позволили выявить многие важные пространственно-временные и другие особенности физики землетрясений. Было установлено, что землетрясения формируют сейсмические пояса, которые совпадают с границами литосферных плит. В связи с этим, большинство особенностей сейсмических явлений были объяснены с точки зрения тектоники плит [1].

С начала XX в. помимо сейсмографических в исследование землетрясений были вовлечены и другие методы — геодезические, геофизические, геохимические и т. д. [2]. В частности, изучение горизонтальных деформаций вблизи разлома Сан-Андреас во время землетрясения 1906 г. позволили Рейду

сформулировать теорию упругой отдачи, которая объясняет механизм косейсмического разрыва земной коры в очаге землетрясения. Помимо этого, исследованиями многих ученых установлена стадийность сейсмического процесса, отраженная в пре-, ко-, пост- и интерсейсмических изменениях различных параметров литосферы в сейсмических поясах [3].

Переход от моно- к мультидисциплинарным исследованиям землетрясений в конце XX в. привел к новым вопросам, прямо связанным с физикой землетрясений.

- Какие силы и как действуют в сейсмоактивных зонах?
- Каков механизм накопления упругих напряжений?
- Как связаны землетрясения и движение литосферных плит?
- Каков механизм афтершоков и форшоков?
- Может ли одно землетрясение быть индуцировано другим, каков механизм миграции очагов землетрясений?
- Могут ли различные геофизические и геохимические предвестники наблюдаться на большом расстоянии от эпицентра сильного землетрясения?

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГОАКТИВНЫЕ ТОЧКИ ЗЕМЛИ — ЯВЛЕНИЕ ВЭТ

Известно, что полевые (натурные) наблюдения играют важную роль в изучении землетрясений. В то же время до сих пор основное внимание уделялось технике сейсмологических наблюдений, обработке и анализу сложных волновых картин, отраженных на сейсмограммах, конфигурации и плотности сейсмических сетей наблюдения, продолжительности мониторинга и др.

Изучая различные динамические и нелинейные явления с 1972 г., автор пришел к выводу, что выбор пунктов наблюдения является ключевым вопросом в дальнейшем понимании протекающих геодинамических процессов и связанных с ними явлений, в частности таких, как землетрясения [4]. Исследуя специфические особенности литосферы как многофазной, полидисперсной, гетерогенной системы, автор установил, что зоны, характеризующиеся пересечением глубоко проникающих (до мантии) активных разломов, являются наиболее гетерогенными зонами литосферы, имеющими особые нелинейные, динамические и физические свойства. Эти зоны характеризуются наибольшей концентрацией упругих дефор-

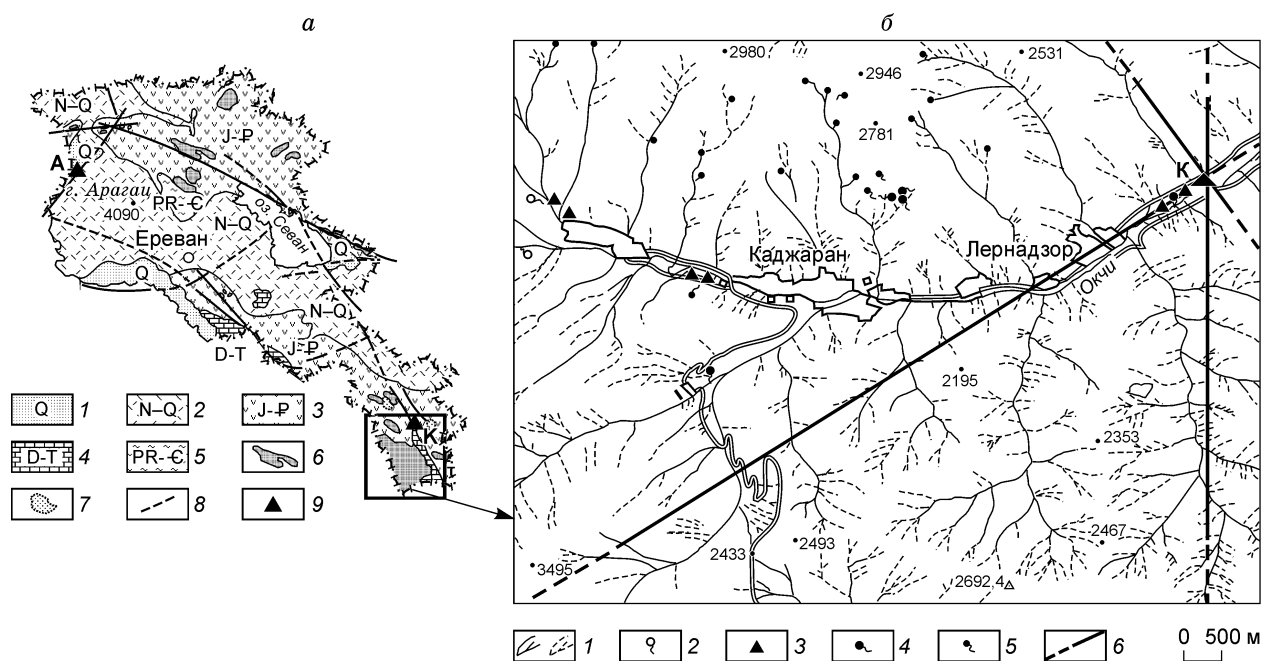


Рис. 1. Местоположение одной из типичных энергоактивных точек (пункт Каджаран, Южная Армения).

a — схематическая геологическая карта Армении. 1 — современные аллювиальные, делювиальные, озерные отложения; 2 — неоген-четвертичные (несцементированные) лавы, туфы, молассовые отложения, глины, пески; 3 — юрско-палеогеновые андезиты, туфы, туфопесчаники, известняки, известняковые глины; 4 — девон-триасовые песчаники, известняки, глины, углистые известняки; 5 — верхнепротерозойские—нижнекембрийские гнейсы, филлиты, мрамор, метаморфические сланцы; 6 — гипербазиты, габбро; 7 — контур рудного поля; 8 — активные разломы; 9 — местоположение станции наблюдений (К — Каджаран, А — Ахурик). *б* — увеличенный масштаб Каджаранской зоны с местоположением минеральных источников. 1 — реки, ручьи; 2 — естественные минеральные источники; 3 — скважины с минеральными водами; 4 — рудничные воды; 5 — источники питьевой воды; 6 — активные разломы.

Рис. 2. Земные приливы, проявленные в различных характеристиках грунтовой воды на энергоактивной точке Каджаран (КАТ) [31].

Компоненты: O_1 — лунно-суточный земных приливов, M_2 — главный лунно-полусуточный, S_1 — солнечно-суточный, S_2 — главный солнечно-полусуточный, S_3 — солнечно-годовой.

маций. Последнее делает их наиболее термодинамически неустойчивыми элементами геологической среды и соответственно наиболее чувствительными к внешним физическим воздействиям различной физической природы [4—6]. В сейсмоактивных зонах доминантой внешних воздействий являются региональные силы упругих напряжений. Ввиду аномально высокой способности к накоплению, перераспределению и выделению различных видов энергии, высокочувствительные локальные зоны литосферы были названы энергоактивными точками Земли [7], а само явление — явлением высокочувствительных энергоактивных точек Земли — явление ВЭТ.

На рис. 1 показана одна из типичных энергоактивных точек Каджаран на юге Армении.

Уникальную чувствительность энергоактивной точки к внешним физическим воздействиям иллюстрируют рис. 2, 3, где видно, что даже земные приливы, периодически создающие деформации земной коры порядка 10^{-8} , отчетливо проявлены в спектре суточных циклов различных параметров подземных вод энергоактивной точки Каджаран: растворенного газа радона (R), температуры воды (t^0), электропроводности (γ) и количества (Q) воды. Это означает, что чувствительность энергоактивной точки Каджаран к периодически меняющимся деформациям земной коры выше чем 10^{-8} (!) [8].

Энергоактивная точка Каджаран расположена в одной из наиболее сложных по своим тектоническим условиям зон Армении, на пересечении трех активных разломов. В геологическом отношении это область широкого распространения магматических гранитоидных интрузий щелочного и субщелочного составов.

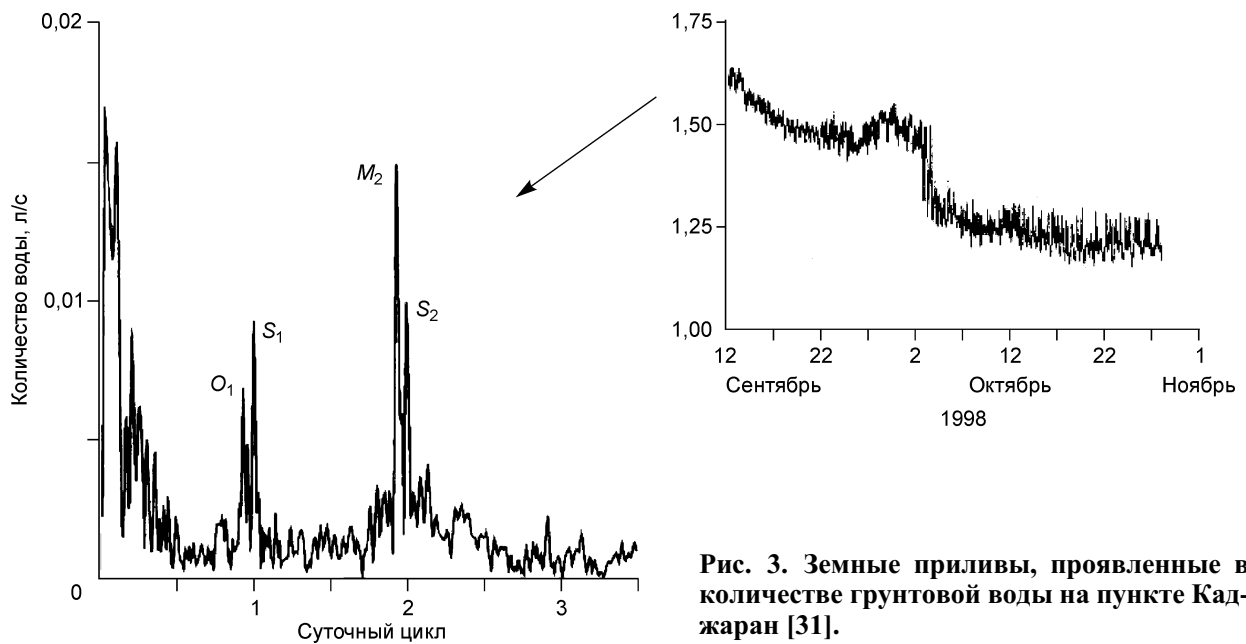
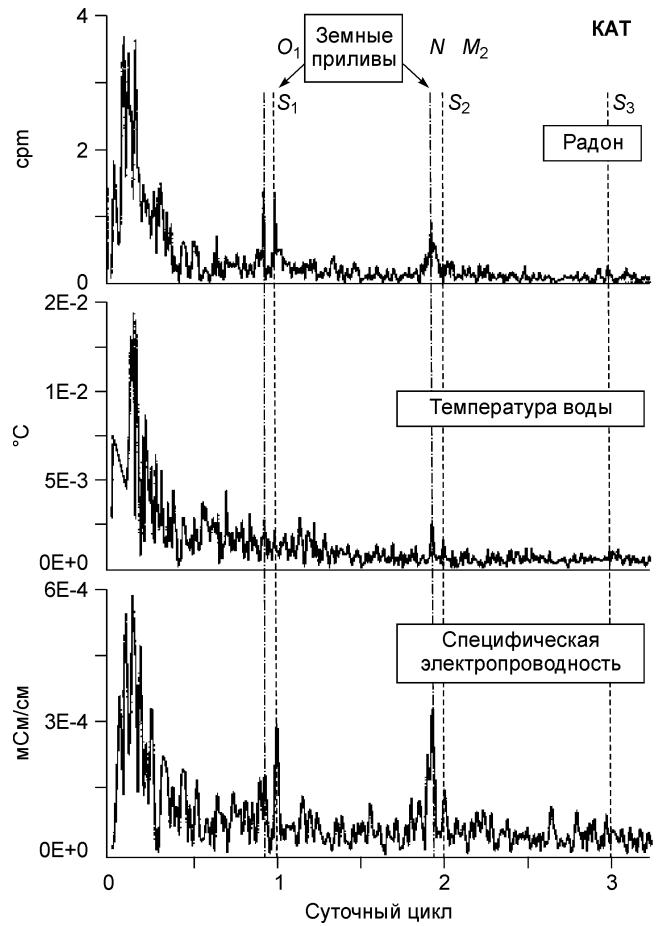


Рис. 3. Земные приливы, проявленные в количестве грунтовой воды на пункте Каджаран [31].

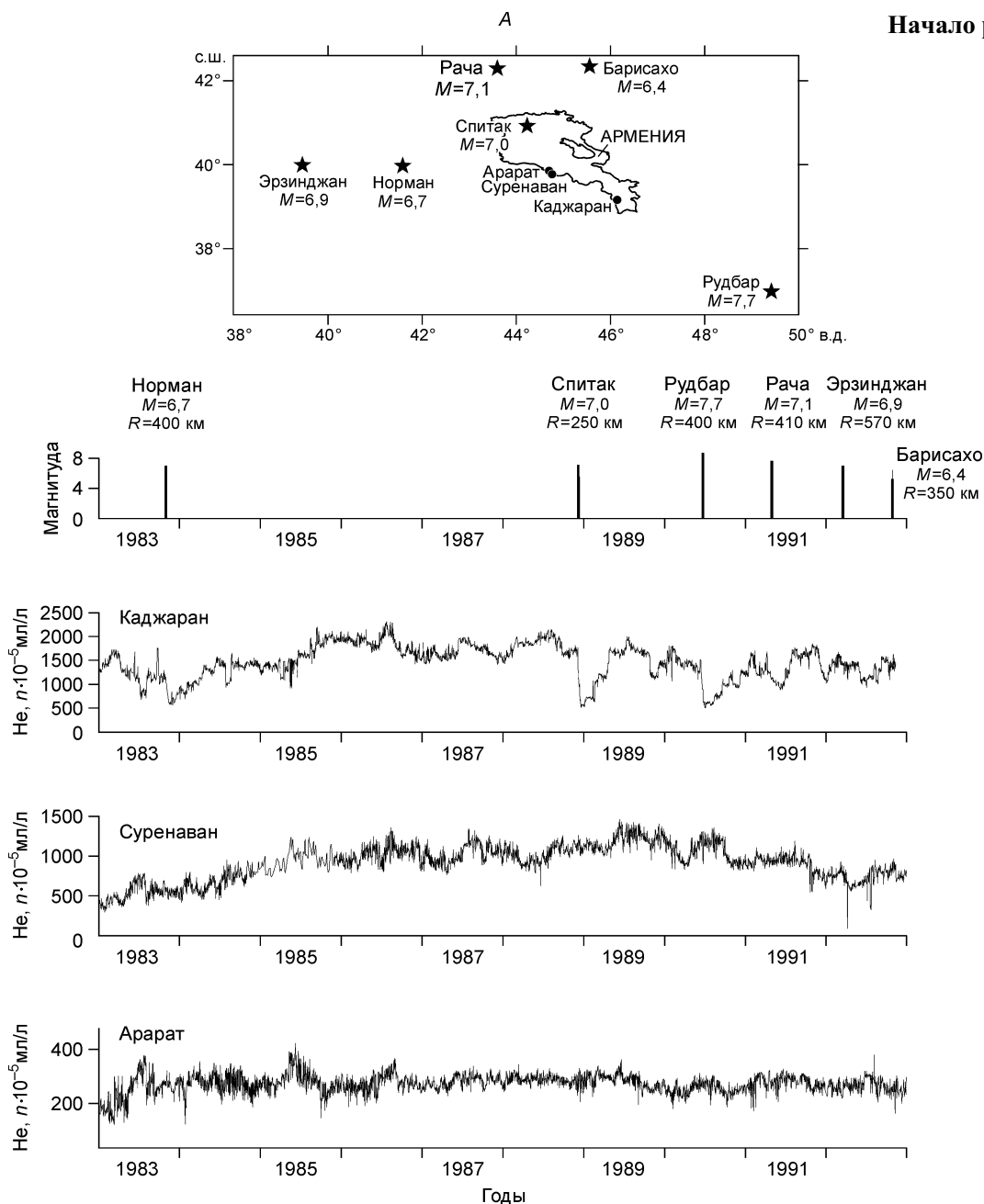
Помимо активной тектоники, ряд факторов свидетельствуют о высокой ослабленности и проницаемости Каджаранской энергоактивной точки, где распространены:

- очаги известных исторических и современных землетрясений ($M_{\max} = 6,5$);
- эндогенные рудные залежи, образованные инъекцией глубинных магматических флюидов;
- трещинные воды и большое количество родниковых источников различной минерализации и температуры;
- изотопы мантийного гелия (${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = 3,9 \cdot 10^{-6} \%$), свидетельствующие о проникновении энергоактивного канала Каджаран вплоть до мантии.

МОНИТОРИНГ ЭНЕРГОАКТИВНОЙ ТОЧКИ КАДЖАРАН

Результаты 10-летних наблюдений за содержанием растворенного гелия в подземных водах энергоактивной точки Каджаран показаны на рис. 4.

Из приведенных данных видны все сильные сейсмические события, которые произошли в регионе в течение 10 лет (Норманское землетрясение, $M = 6,7$; Турция, 1983; Спитакское, $M = 7,0$, Армения, 1988; Рудбарское, $M = 7,7$, 1990; Рачинское, $M = 7,1$ Грузия, 1991). Они отчетливо проявлены глубокими



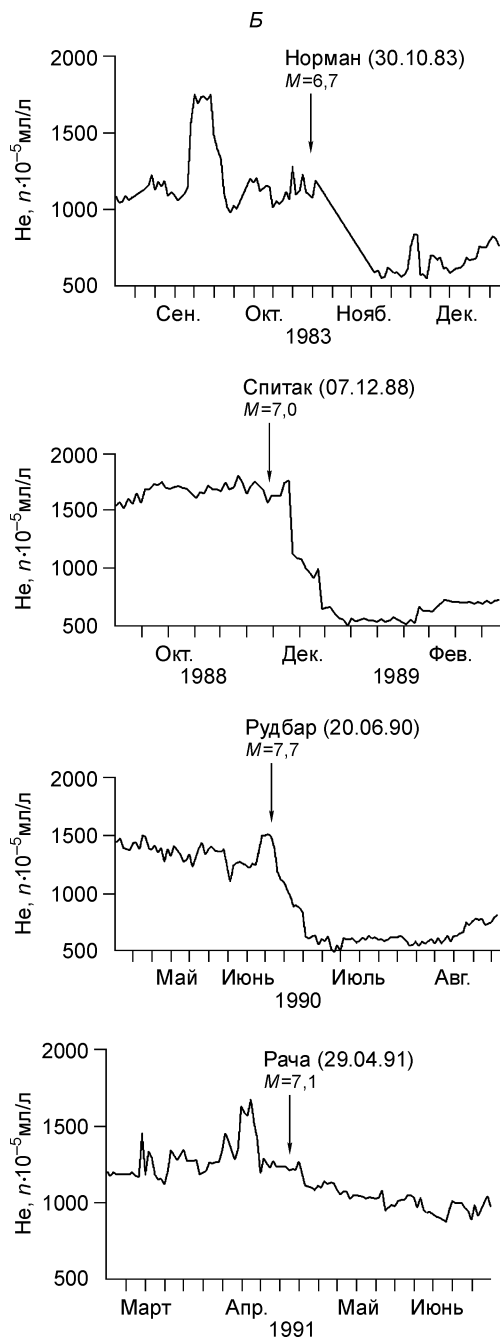


Рис. 4. Изменения содержания He в грунтовой воде:

А — на пунктах Каджаран, Суренаван и Арагат; *Б* — на пункте Каджаран в период сильных землетрясений (увеличенный масштаб косейсмических изменений He).

косейсмическими минимумами с полугодным постсейсмическим восстановлением содержаний He до предсейсмического уровня.

После Рачинского сейсмического события (1992) аномалии He проявлены значительно хуже, чем при землетрясениях Эрзинджан (Турция, 1992) и Барисахо (Грузия, 1992), так как, по крайней мере, полгода необходимо для восстановления его содержаний после сильного сейсмического события, как это наблюдалось при Норманском, Спитакском и Рудбарском землетрясениях.

Итак, можно сделать следующие выводы.

— Сильные землетрясения региона с $M > 6,5$ проявлены ко- и постсейсмически в содержаниях растворенного He на энергоактивной точке Каджаран на расстоянии многих сотен километров от очага землетрясений.

— Все сильные землетрясения ($M > 6,5$) проявляются однотипно на энергоактивной точке Каджаран в виде глубоких косейсмических минимумов He и постсейсмического восстановления его уровня до предсейсмического. Это означает, что в случае сильного сейсмического события на любом расстоянии от пункта наблюдения Каджаран в пределах одной и той же сейсмоактивной зоны действует один и тот же механизм деформации (в виде сжатия) энергоактивной точки Каджаран, аномально понижая содержание He в ее подземных водах.

— Ни один другой из пунктов наблюдений за содержанием He не имеет такой чувствительности к сильным землетрясениям, как энергоактивная точка Каджаран. Это означает, что одно и то же землетрясение по-разному проявляется на разных пунктах наблюдения в зависимости от локальных физико-геологических условий.

На рис. 5 изображены высокоточные данные регистрации проводимости (γ) подземных вод на наблюдательном пункте Каджаран в 1996—1998 гг., а также на других наблюдательных пунктах, полученные в рамках международного проекта „READINESS“. Видно, что все сильные сейсмические события, имевшие место в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит, отчетливо проявлены на наблюдательном пункте Каджаран в виде косейсмических минимумов проводимости (γ) подземных вод и постсейсмического восстановления ее до прежнего уровня.

Исключение составляет землетрясение с $M = 6,1$ (февраль 1997, Иран), спустя 3 месяца после которого произошло землетрясение с $M = 7,3$ (май 1997, Иран). В результате такой короткой последовательности сейсмических событий процесс постсейсмического восстановления проводимости после землетрясения с $M = 6,1$ был прерван резким косейсмическим падением проводимости, связанным с землетрясением $M = 7,3$.

Косейсмические минимумы проводимости (см. рис. 4 и 5) связаны, как и в случае с гелием (см. рис. 1), с однотипным сильным сжатием пор и микротрещин горных пород в энергоактивной точке Каджаран.

Результаты уникальных наблюдений, выполненных по проекту „READINESS“, до и после Измитского землетрясения (17 августа 1999, $M = 7,4$, Турция) показаны на рис. 6. Видно, что во время этого землетрясения на наблюдательном пункте Каджаран, расположенном на расстоянии 1380 км от очага землетрясения, произошло резкое косейсмическое повышение количества (Q) подземных вод и одновременное резкое косейсмическое уменьшение их проводимости.

После землетрясения отчетливо видно 2,5-месячное постсейсмическое восстановление количества и проводимости подземных вод до первоначального уровня. Представляют также интерес и предсейсмиче-

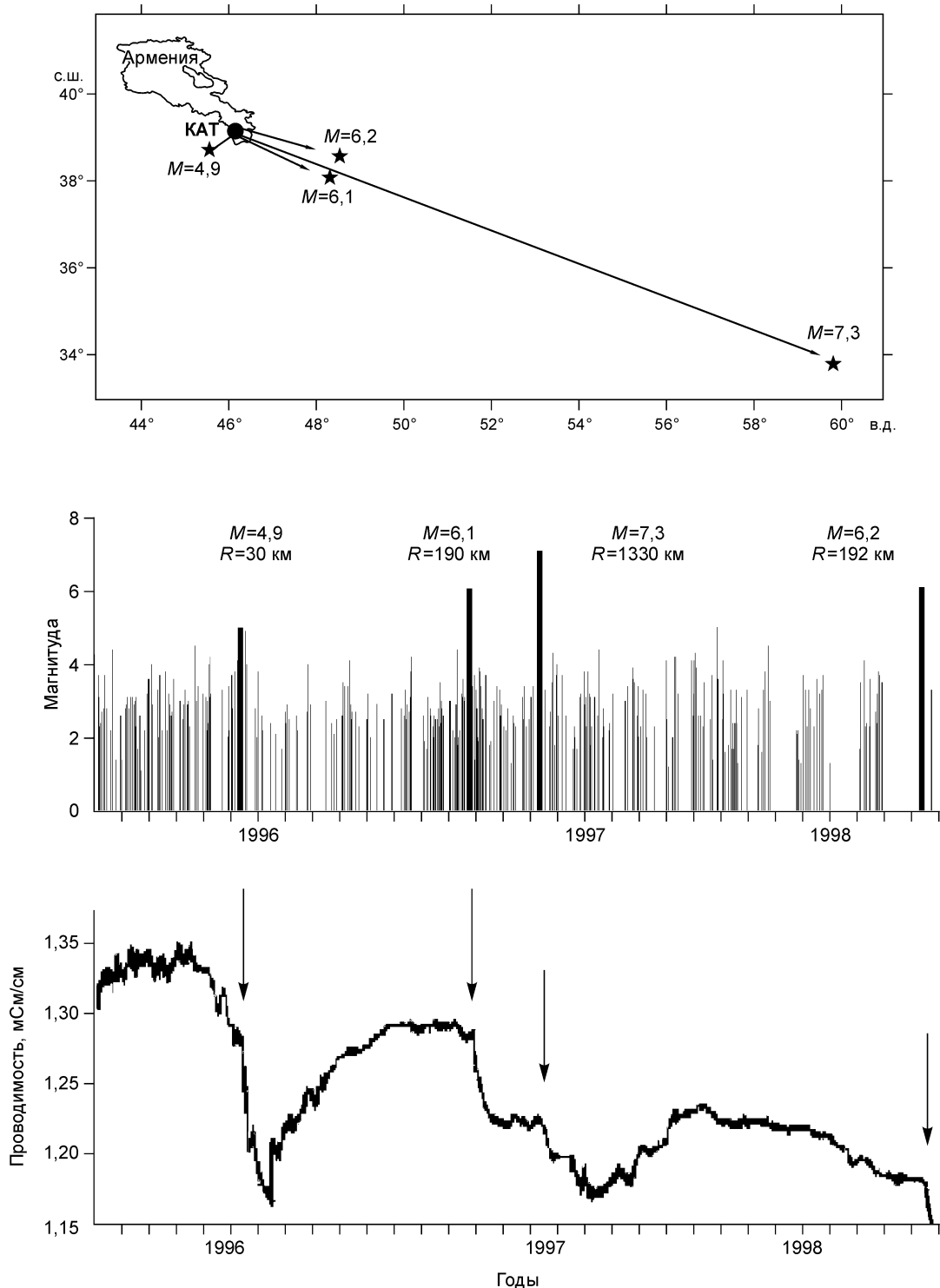
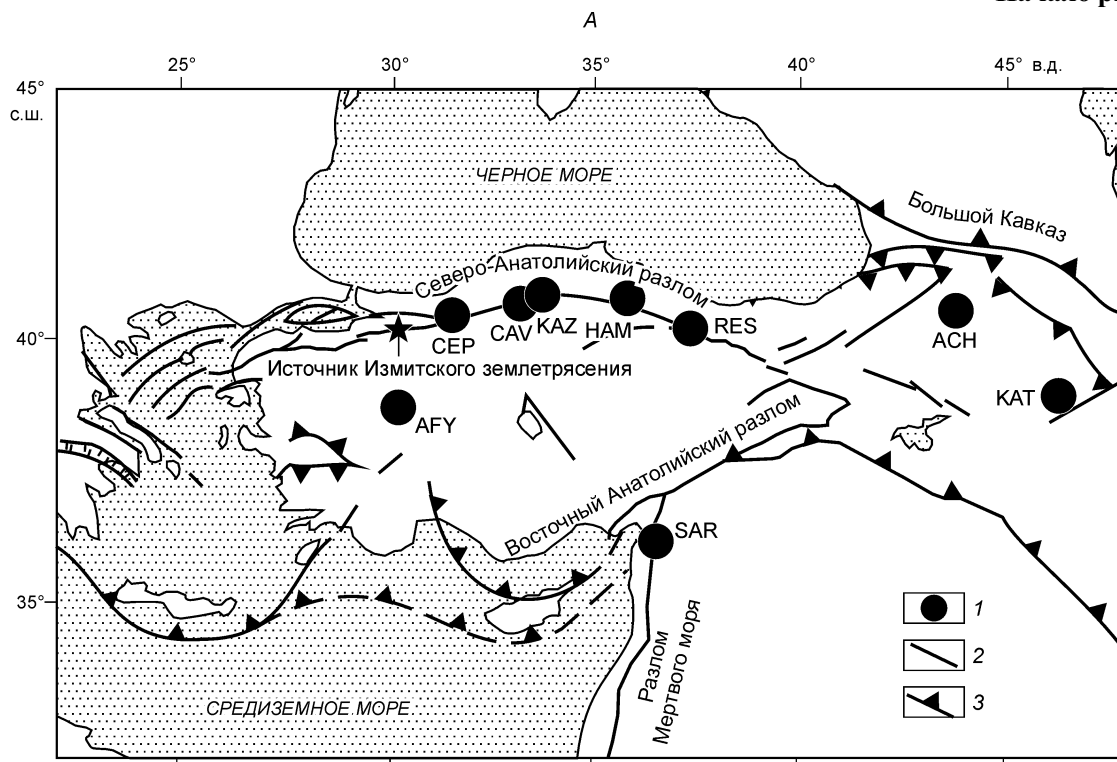


Рис. 5. Высокоточные наблюдения специфической электронной проводимости грунтовой воды в период 1996—1998 гг. на пункте Каджаран, в рамках проекта „READINESS“ [31].

ские аномалии Q и γ (рис. 6), начавшие проявляться одновременно за 5 месяцев до сейсмического события. Относительно отрицательной аномалии S , наблюдавшейся в конце ноября 1998 г., можно сказать, что она, вероятно, не имеет сейсмогенной природы, так как не сопровождается одновременным повышением Q .

Таким образом, подводя итог наблюдениям на пункте Каджаран, не обсуждая пред- и постсейсмические аномалии, можно утверждать, что подобно всем другим случаям, рассмотренным выше, энергоак-



тивная точка Каджаран отреагировала на сильное Измитское землетрясение типичным сжатием. Об этом свидетельствуют резкое одновременное косейсмическое уменьшение C и увеличение Q .

Анализируя косейсмические эффекты γ и Q , зарегистрированные в 10-минутном интервале на пункте Каджаран, можно отметить следующее.

— Сильное и резкое увеличение количества воды наблюдалось в интервале времени $8 \text{ мин } 21 \text{ с} \leq \Delta t \leq 18 \text{ мин } 21 \text{ с}$ ($\Delta t = t_0 - t_1$, где $t_0 = 00:01:39$ — время в очаге землетрясения, $t_1 = 00:10:00$ — $00:20:00$ — время сильного и резкого изменения количества воды) после главного Измитского сейсмического толчка ($M = 7,4$) на пункте Каджаран, расположенном на расстоянии 1380 км от эпицентра Измитского землетрясения.

— Интервал времени изменения Q от пред- до постсейсмического состояния состоит из двух частей, быстрый (30 ± 10 мин) и медленный (3—5 ч).

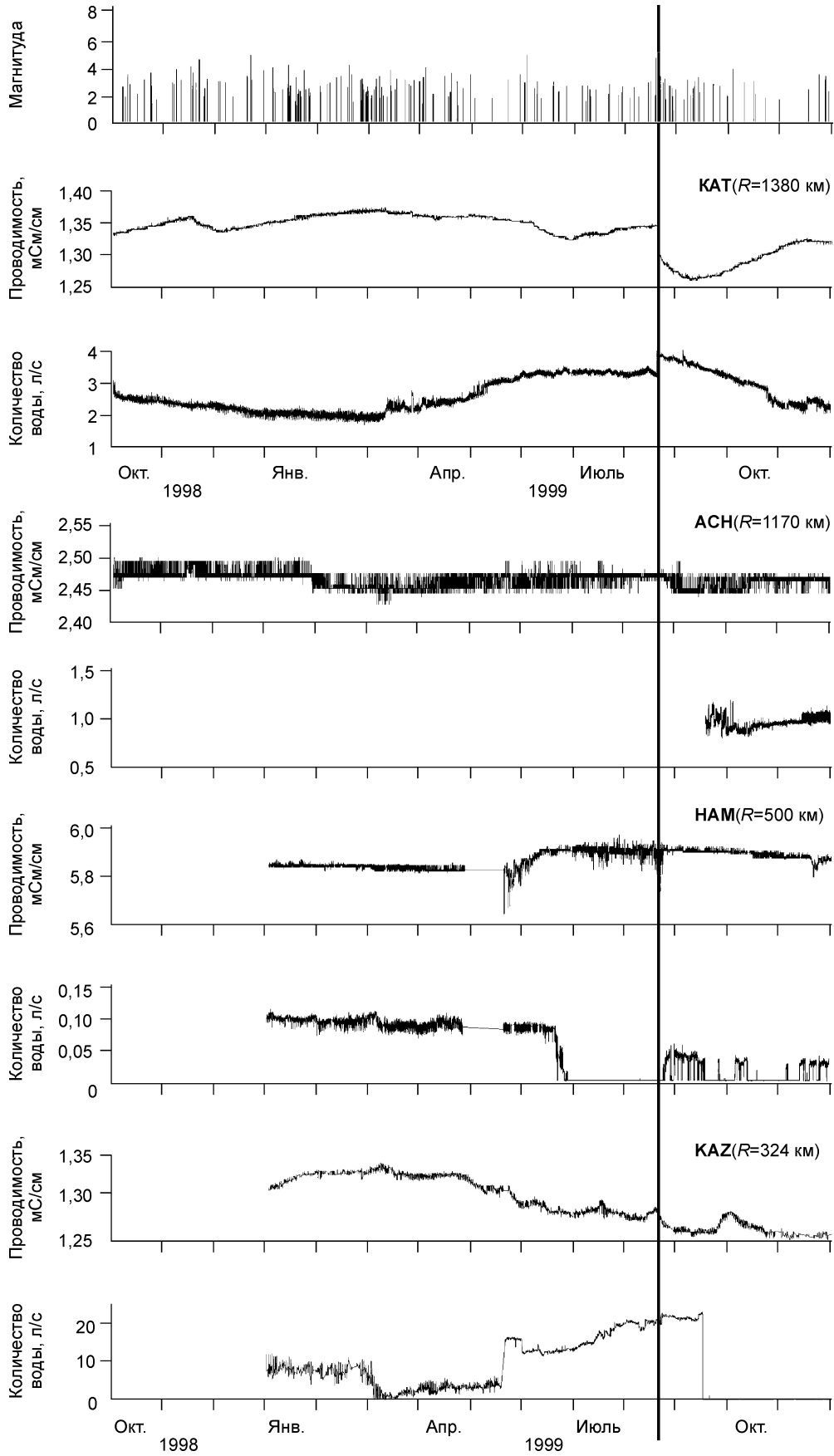
— Сильное и резкое уменьшение проводимости наблюдалось в течение 1 ч 20—30 мин после главного сейсмического толчка и 1 ч 10—20 мин после резкого увеличения количества воды.

— Интервал времени изменения γ от пред- до постсейсмического состояния землетрясения составил 1 ч 10—20 мин.

На рис. 7 показана принципиальная геологическая модель, которая поясняет однородное косейсмическое сжатие энергоактивной точки Каджаран при всех сильных землетрясениях, имевших место в пределах зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит.

В случае резкого сжатия энергоактивного канала Каджаран под действием внешних сил пресная вода проникает из вмещающих приповерхностных интенсивно-трещиноватых горных пород через поры и микротрещины в наблюдательную скважину Каджаран и смешивается с минерализованными водами коренных пород. В результате проводимость подземных вод в наблюдаемой скважине резко уменьшится, а количество воды увеличится. На качественном уровне предложенная модель не противоречит вышеприведенным количественным данным, т. е. скорости, интервалу времени и величине изменений Q и γ после Измитского землетрясения. Однако количественное моделирование необходимо как следующий шаг для лучшего понимания механизма косейсмических изменений Q и γ в энергоактивной точке.

Данные уникальной многопараметровой сети наблюдений на территории Армении иллюстрирует рис. 8: до (июнь—июль), в течение (август) и после (сентябрь—октябрь) Измитского землетрясения. Видно, что в июне на территории Армении наблюдались 12 аномалий различных параметров. За аномалию приняты значения меняющихся во времени геофизических, геохимических и других измеряемых



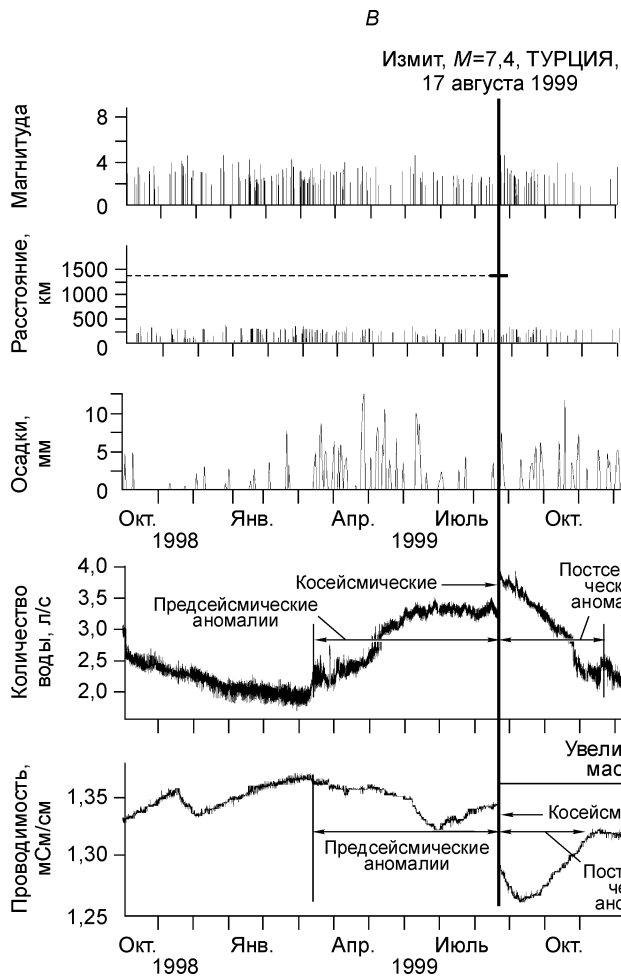


Рис. 6. Изменения проводимости и количества подземных вод во время Измитского землетрясения ($M = 7,4$, Турция, 1999) на различных наблюдательных пунктах.

A — местонахождение наблюдательных пунктов; *1* — наблюдательные пункты (КАТ, АСН и др.), *2* — активные разломы; *3* — надвиги; *Б* — изменения параметров грунтовой воды на различных расстояниях от очага Измитского землетрясения; *В* — увеличенный масштаб пред-, ко-, постсейсмических изменений количества воды и проводимости на энергоактивном пункте Каджаран.

параметров на наблюдательных пунктах, отклонение которых от нормальной величины больше или равно трем стандартам, а также те значения, которые характеризуются продолжительной неизменностью во времени („затишьем“). Число аномалий в июле было приблизительно тем же, т. е. равно 11, но с некоторым

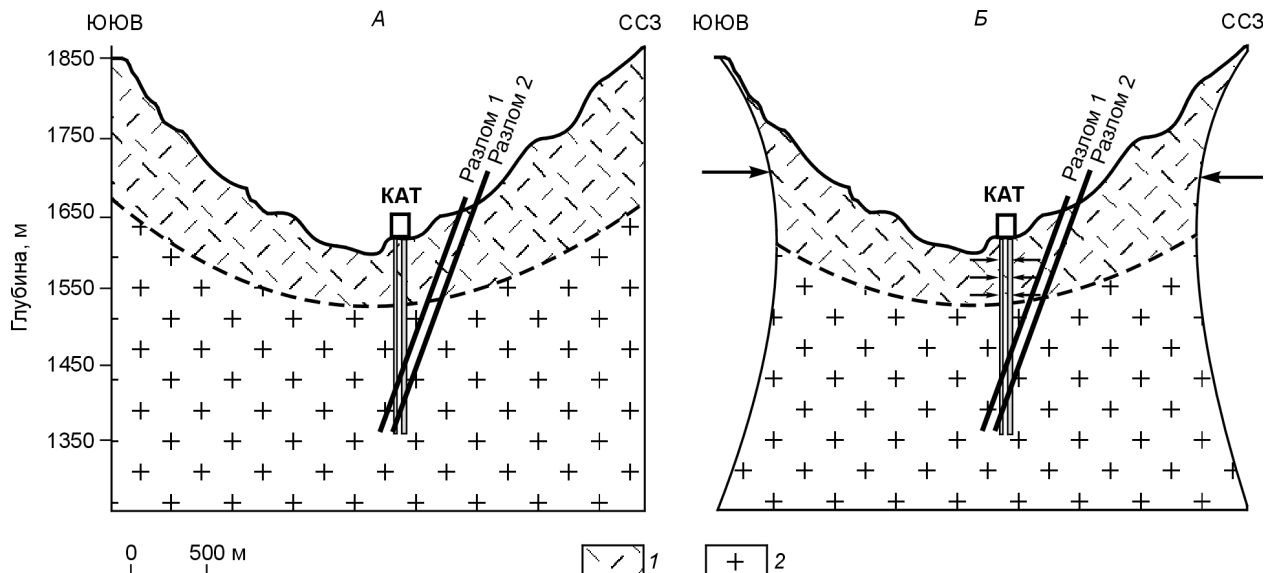
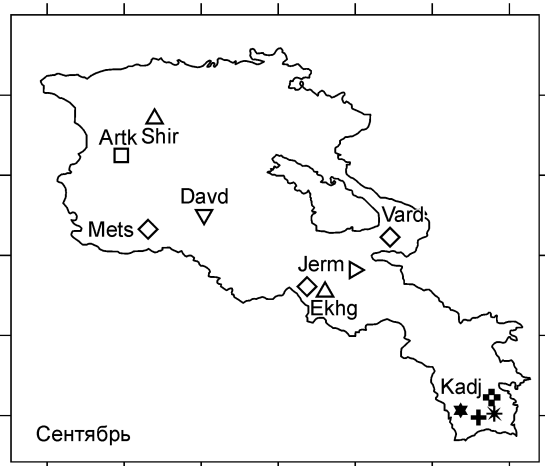
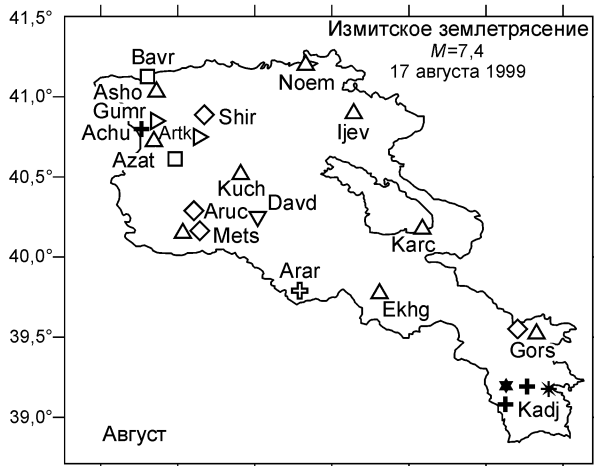
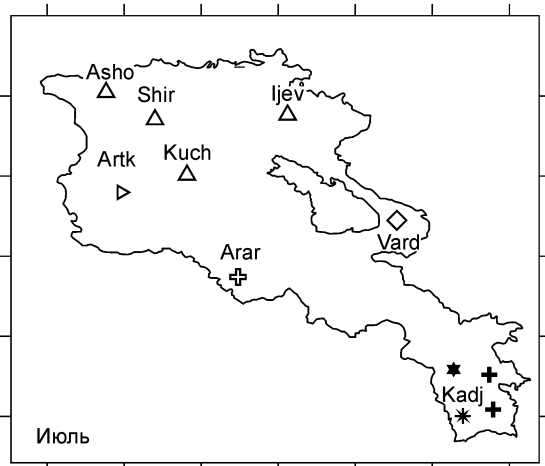
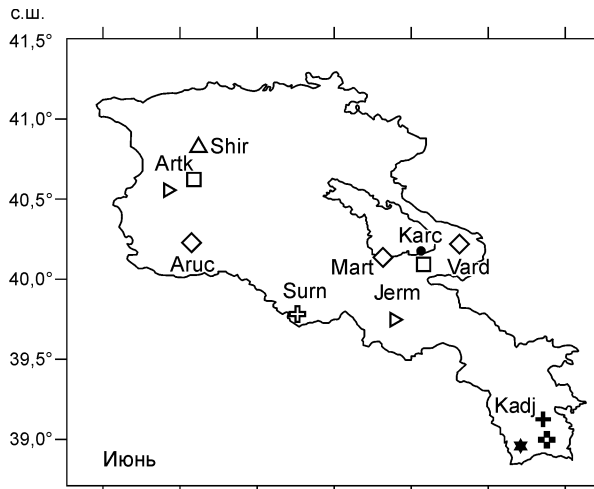
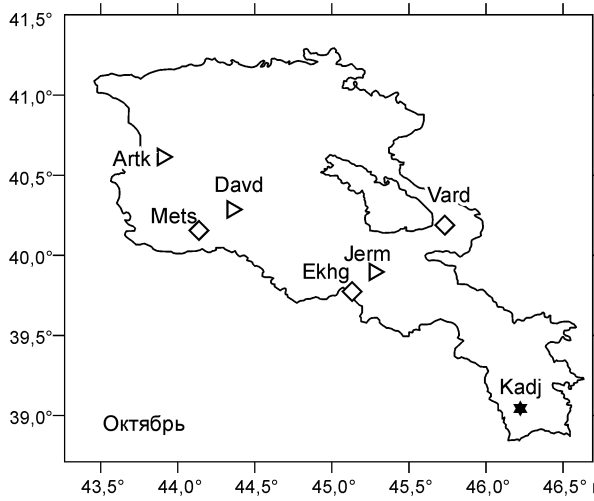


Рис. 7. Принципиальная геологическая модель на пункте Каджаран.

A — первоначальное состояние; *Б* — под воздействием внешних сил сжатия. *1* — зона интенсивной трещиноватости с пресной водой, *2* — плотные интрузивные и субинтрузивные горные породы с минеральной водой.



43,5° 44,0° 44,5° 45,0° 45,5° 46,0° 46,5° в.д.



43,5° 44,0° 44,5° 45,0° 45,5° 46,0° 46,5° в.д.

□ 1	+
▷ 2	*
◇ 3	★ 8
⊕ 4	⊕ 9
△ 5	▽ 10

Рис. 8. Реакция многопараметровой сети наблюдений на территории Армении до, во время и после Измитского землетрясения.

Параметры: 1 — геомагнитный, 2 — электромагнитный, 3 — выделение радона, 4 — геохимический, 5 — уровень грунтовых вод, 6 — проводимость, 7 — pH, 8 — дебит, 9 — температура воды, 10 — биологический (поведение рыб в аквариуме).

пространственным перемещением аномальных точек. В августе количество зарегистрированных аномалий резко возросло, составив 23(!). В сентябре оно упало до предсейсмического уровня (12) и осталось неизменным в октябре. Природа по-разному распределенных в пространстве аномалий обсуждена в [5].

Рис. 9. Зарегистрированная сейсмичность с магнитудой $M \geq 2$ до, во время и после Измитского землетрясения (август 1999) по всей территории Кавказа.

Таким образом, в период Измитского землетрясения вся территория Армении (август 1999) была охвачена аномалиями различной физической природы. Примечательно, что в августе 1999 г. резко возросла и сейсмичность по всему Кавказскому региону (рис. 9).

В представленной работе использован каталог землетрясений НССЗ Армении, высокое качество которого отмечено многими зарубежными исследователями. Каталог содержит 18 тыс. сейсмических событий с $M \geq 2$ за период 1962—2001 гг.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя вышеприведенные данные, мы пришли к выводу, что только два возможных механизма, вызывающих зарегистрированные явления на энергоактивной точке Каджаран, заслуживают специального обсуждения.

Первый — это прямое воздействие динамической волны (распространяющейся от очага Измитского землетрясения) на энергоактивную точку Каджаран, имея в виду, что скорость $1,253 \text{ км/с} \leq v \leq 2,754 \text{ км/с}$ (из расчета прохождения 1380 км за 8 мин 21 с—18 мин 21 с) прямого воздействия сопоставима со скоростью распространения упругой волны в случае $v = 2,754 \text{ км/с}$.

Оценка прямого воздействия распространяющейся волны на энергоактивную точку Каджаран показывает, что она имеет низкую вероятность по следующим причинам.

— Величина воздействия землетрясения с $M = 7,4$ на расстоянии 1380 км сопоставима с земными приливами 10^{-7} — 10^{-8} [9].

— Нет никаких признаков воздействия распространяющейся волны от очага Измитского землетрясения на наблюдательных станциях, расположенных гораздо ближе к очагу Измитского землетрясения, чем станция Каджаран (см. рис. 6).

— Нет эффекта растяжения на пункте Каджаран, а наблюдается всегда один и тот же эффект сжатия, чего не может быть при распространении сейсмической волны, так как в этом случае должны наблюдаться как сжатие, так и растяжение.

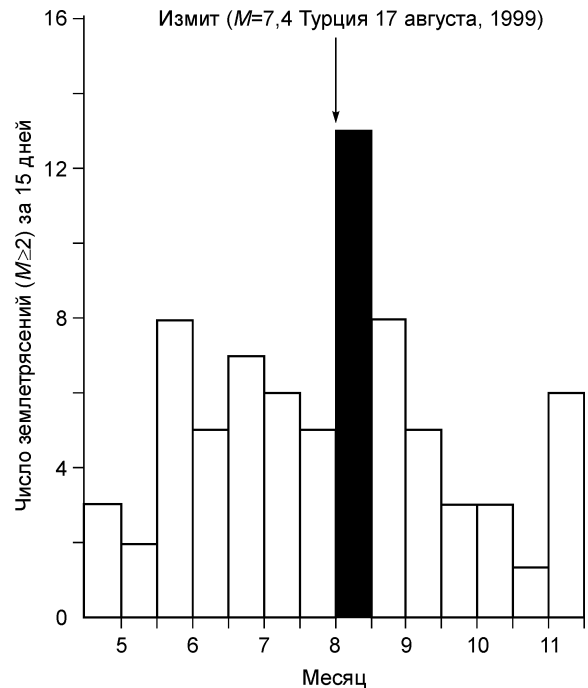
Второй возможный механизм — это не прямое воздействие определенных сил на энергоактивную точку, причем всегда приводящее к ее сжатию при любых сильных землетрясениях по всей зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит. Одна из возможных гипотез, объясняющих этот механизм, выглядит следующим образом.

До сильного сейсмического события каждая точка зоны коллизии находится в квазиравновесном состоянии под действием двух противоположно направленных главных сил, внешней региональной силы упругого напряжения (\vec{F}_E) и внутренней силы упругой деформации (\overleftarrow{F}_I), т. е.

$$\vec{F}_E = -\overleftarrow{F}_I. \quad (1)$$

Во время разрыва земной коры под действием внешней силы упругого напряжения \vec{F}_E , достигшей критического уровня, происходит сброс (ослабление) силы \overleftarrow{F}_I на некоторую величину $\Delta\overleftarrow{F}_I$. Сброс ($\Delta\overleftarrow{F}_I$) немедленно провоцирует компенсирующую подвижку давящей на зону коллизии литосферной плиты на расстояние δ по направлению движения. Таким образом, возникает компенсирующая сила $\Delta\vec{F}_E$ импульсного движения плиты как реакция на сброс $\Delta\overleftarrow{F}_I$. В результате выражение (1) примет следующий вид:

$$\vec{F}_E + \Delta\vec{F}_E = -\overleftarrow{F}_I - \Delta\overleftarrow{F}_I, \quad (2)$$



отражая установление нового квазиравновесного состояния. Рассмотрим процесс взаимодействия двух главных сил \vec{F}_E и \overleftarrow{F}_l , действующих в зоне коллизии, и вытекающие из этого следствия в более развернутом виде*.

Горизонтальная составляющая упругих напряжений на поверхности границы раздела Аравийской плиты с зоной коллизии определяется выражением

$$P_{E(x)} = \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} (-k\sigma_{xx} + \sigma_{xz}), \quad (3)$$

где k — тангенс угла расщепления Аравийской плитой Евразийскую (или тангенс угла клина Аравийской плиты, расщепляющей Евразийскую); σ_{xx} , σ_{xz} — нормальные и касательные напряжения, вычисленные асимптотическим методом теории упругости [10] в предположении, что Аравийская плита перемещается на величину Δ в направлении Евразийской плиты, т. е. против оси x и взаимодействует с зоной коллизии по закону трения Кулона.

До землетрясения движение Аравийской плиты создает напряжение $P_{E(x)}$, которое вызывает силу упругой деформации $F_{l(x)}$, определяющуюся выражением

$$F_{l(x)} = b \sqrt{k^2 + 1} \int_0^{h/k} P_{E(x)}(x) dx, \quad (4)$$

где h — средняя мощность зоны коллизии от поверхности до зоны расщепления; b — линейные размеры фронта движения плиты.

Подставляя (3) в (4) и вычисляя интеграл, получим

$$F_{l(x)} = -\frac{kEb}{v(1+v)} \Delta, \quad (5)$$

где E — модуль упругости Юнга, v — коэффициент Пуассона.

Из (5) определяется жесткость среды (C)

$$C = \frac{kEb}{v(1+v)}, \quad (6)$$

и тогда

$$F_{l(x)} = -C\Delta. \quad (7)$$

Подставляя в (6) значения $k = h/L = 0,02$, где $h = 12$ км, по [5]; L — 600-километровая зона расщепления клином Аравийской плиты вдоль направления ее движения;

$$E = 2(1+v)\mu,$$

где $v = \frac{1}{4}$, а $\mu = 5 \cdot 10^{11}$ дин/см² — модуль сдвига; $b = 2000$ км, имея в виду дугообразный фронт движения Аравийской плиты; получим жесткость среды $C = 1,6 \cdot 10^{19}$ дин/см. Переходя от силы $F_{l(x)}$ к упругой энергии $E_{l(x)}$, запишем

$$E_{l(x)} = \frac{C}{2} \Delta^2. \quad (8)$$

Подставляя полученные значения $C = 1,6 \cdot 10^{19}$ дин/см, а также $\Delta = 1,8$ см (ежегодная величина перемещения Аравийской плиты по данным GPS [11]), определим, что движением Аравийской плиты в зоне коллизии создаются упругие деформации, энергия которых составляет: за 1 год $E = 2,6 \cdot 10^{19}$ эрг, за 10 лет $E = 2,6 \cdot 10^{21}$ эрг и за 100 лет $E = 2,6 \cdot 10^{23}$ эрг. Землетрясение в зоне коллизии вызывает сброс сил упругих напряжений, провоцируя компенсирующую подвижку Аравийской плиты на величину δ за время τ . Имея в виду, что к примеру Измитское землетрясение с $M = 7,4$ сопровождалось сбросом эквивалентной энергии порядка $\Delta E_c \cong 10^{23}$ эрг, можно оценить величину компенсирующей подвижки Аравийской плиты из соотношения

$$mgh + C \frac{\delta^2}{2} = \Delta E_c, \quad (9)$$

* Написано совместно с Р.С. Геворкяном (Институт механики НАН Армении, г. Ереван).

где mgh — потенциальная энергия приподнятия зоны коллизии при подвижке клина Аравийской плиты на величину δ (m — масса зоны коллизии, g — ускорение свободного падения, h — высота), $C \frac{\delta^2}{2}$ — упругая энергия зоны коллизии, возникающая при подвижке Аравийской плиты на величину δ . Поскольку величину h можно представить как $h = k\delta$, то выражение (9) можно записать

$$mgk\delta + C (\delta^2/2) = \Delta E_c. \quad (10)$$

Пренебрегая в выражении (10) членом $C (\delta^2/2)$ как весьма малой величиной, определим

$$\delta = \frac{\Delta E_c}{mgk}. \quad (11)$$

Подставляя в (11) значения $\Delta E_c \cong 10^{23}$ эрг, $m = 2,4 \cdot 10^{16}$ т ($m = \frac{1}{2} hlb\rho$, где $h = 12$ км — средняя мощность зоны коллизии, $l = 600$ км — расстояние от фронта движения Аравийской плиты до конца зоны расщепления, $b = 2000$ км — фронт движения Аравийской плиты, $\rho = 3,3$ г/см³ — плотность зоны коллизии), $g = 980$ см/с², $k = 0,02$, получим, что величина горизонтальной подвижки $\delta = 0,2$ см, а величина вертикального приподнятия расщепленной части зоны коллизии $h = 2 \cdot 10^{-3}$ см.

Результаты показывают, что сброс напряжений при сильных землетрясениях ($M > 6,5$) может быть компенсирован импульсным движением Аравийской плиты на величину порядка 0,2 см. Это означает, что при одном землетрясении $M = 7,4$ в год, составляющая импульсного перемещения плиты может достигать 11 % от общей величины перемещения $\Delta = 1,8$ см, обусловленной конвективным движением тепловых потоков в мантии.

Чтобы представить, что в компенсирующем механизме при сбросе напряжений в зоне коллизии во время сильного землетрясения участвуют именно литосферные плиты типа Аравийской, оценим необходимую массу и размеры плиты, способной компенсировать своей подвижкой $\delta = 0,2$ см сброс напряжений в зоне коллизии при сильных землетрясениях.

Если предположить, что сила сопротивления движению плиты постоянна, т. е. не зависит от скорости движения плиты, тогда дифференциальное уравнение движения плиты будет

$$\Delta F_E = M\ddot{u} = -Cu - \Delta F_{тр}, \quad (12)$$

где M — масса, u — отклонение от равновесного состояния, C — жесткость среды, $\Delta F_{тр}$ — сила трения.

При начальных условиях $t = 0$, $u = \delta$, $\dot{u} = 0$ уравнение (12) можно представить в виде

$$\ddot{u} + \omega^2 u = -\frac{\Delta F_{тр}}{M}, \quad (13)$$

где ω — круговая частота,

$$\omega^2 = \frac{C}{M}. \quad (14)$$

Решая уравнение (13), получим

$$u = A \sin \omega t + B \cos \omega t - \frac{\Delta F_{тр}}{C}, \quad (15)$$

и, следовательно,

$$\dot{u} = A\omega \cos \omega t - B\omega \sin \omega t. \quad (16)$$

Удовлетворяя вышеприведенным начальным условиям, получим

$$\begin{cases} u = (\delta + \frac{\Delta F_{тр}}{C}) \cos \omega t - \frac{\Delta F_{тр}}{C} \\ \dot{u} = -\omega(\delta + \frac{\Delta F_{тр}}{C}) \sin \omega t. \end{cases} \quad (17)$$

Предполагая, что подвижка Аравийской плиты происходит на величину δ за время $\tau = \frac{1}{2} T$ (T — период колебаний), т. е. при $t = \tau$

$$\begin{cases} u = 0 \\ \dot{u} = 0, \end{cases} \quad (18)$$

получим

$$\begin{cases} -\delta - \frac{\Delta F_{\text{тп}}}{C} - \frac{\Delta F_{\text{тп}}}{C} = 0 \\ \sin \omega \tau = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Из (19) определим

$$\begin{cases} \Delta F_{\text{тп}} = -\frac{\delta C}{2} \\ \tau = \frac{\pi}{\omega}. \end{cases} \quad (20)$$

где τ — первый, отличный от нуля, корень уравнения $\sin \omega \tau = 0$.

Подставив выражение (20) в (17), получим

$$\begin{cases} u = \frac{\delta}{C} \cos \omega t + \frac{\delta}{2} \\ \dot{u} = -\omega \frac{\delta}{2} \sin \omega t. \end{cases} \quad 0 \leq t \leq \tau = \frac{\pi}{\omega}. \quad (21)$$

Из второго выражения системы (20) имеем

$$\omega = \frac{\pi}{\tau}. \quad (22)$$

Учитывая (22), а также то, что $\omega = \sqrt{\frac{C}{M}}$, можно получить массу плиты, которая при сбросе напряжений ΔF_1 может испытать подвижку на величину δ

$$\omega^2 = \frac{C}{M} = \frac{\pi^2}{\tau^2}, \quad (23)$$

откуда

$$M = \frac{C\tau^2}{\pi^2}. \quad (24)$$

Подставляя в (24) значения $C = 1,6 \cdot 10^{19}$ дин/см², $\tau = 10^3$ с, согласно ранее приведенным данным, получим, что масса движущейся плиты равна $M = 1,6 \cdot 10^{18}$ т.

Исходя из того, что

$$M = SH\rho, \quad (25)$$

где S — площадь плиты, H — ее мощность, ρ — удельная плотность, можно определить размеры плиты ($S \times H$), испытавшей компенсирующую подвижку,

$$S \cdot H = \frac{M}{\rho}. \quad (26)$$

Подставляя в выражение (26) значения $M = 1,6 \cdot 10^{18}$ т, $\rho = 3,3$ г/см³, получим $S \cdot H = 4,8 \cdot 10^{23}$ см³. Это означает, что размеры плиты могут быть: ширина $N \cong 1500$ км, длина $L \cong 3000$ км и мощность $H = 100$ км, что хорошо согласуется с размерами Аравийской плиты.

Упругая энергия, передаваемая подвижкой Аравийской плиты зоне коллизии, определяется как

$$\Delta E_{\text{упр}} = \frac{C\delta^2}{2}. \quad (27)$$

Подставляя в выражение (27) значение $C = 1,6 \cdot 10^{19}$ дин/см², $\delta = 0,2$ см, получим $\Delta E_{\text{упр}} = 3,2 \cdot 10^{17}$ эрг(!). При сопоставлении этой величины упругой энергии с энергией сброса $\Delta E_c = 10^{23}$ эрг становится понятным, что подавляющая часть компенсирующей энергии при подвижке Аравийской плиты на расстояние $\delta = 0,2$ см расходуется на приподнятие расщепленной части зоны коллизии на высоту $H = 2 \cdot 10^{-3}$ см. Таким образом, выдвинутая гипотеза о спровоцированной подвижке Аравийской плиты сбросом напряжений при сильных землетрясениях ($M > 6,5$) в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит заслуживает внимания. Она объясняет все явления, наблюдавшиеся на территории Армении вообще и на энергоактивной точке Каджаран в частности, в период Измитского катастрофического землетрясения 17 августа 1999 г., а также других сильных сейсмических событий зоны коллизии.

ВЫВОДЫ

Обобщая результаты, можно прийти к следующему заключению.

1. По крайней мере, ко- и постсейсмические реакции различных параметров литосферы наблюдаются на расстоянии в несколько сотен километров от очагов всех сильных землетрясений, происшедших в пределах одной и той же зоны коллизии.

2. Одни и те же сильные землетрясения проявляются по-разному в различных точках наблюдения. Это означает, что реакция пункта наблюдения зависит от локальных физико-геологических условий вмещающей среды.

3. Наиболее чувствительными к внешним физическим воздействиям вообще и к воздействию региональных сил упругих наблюдений в частности, являются так называемые высокочувствительные энергоактивные точки Земли (явление ВЭТ).

4. Явление ВЭТ было открыто и исследовано автором в наиболее термодинамически нестабильных зонах геологической среды и, соответственно, более чувствительных к внешним физическим воздействиям различной природы.

5. В случае коллизии Аравийской и Евразийской плит все землетрясения с $M > 6,5$ проявляются однотипно на энергоактивной точке Каджаран (в виде ее сжатия). Это означает, что в случае сильного землетрясения один и тот же механизм воздействует на энергоактивную точку Каджаран при любом эпицентральной расстоянии от нее, в пределах той же зоны коллизии.

6. Одним из очень предварительных и гипотетических механизмов, который должен быть проверен дальнейшим математическим моделированием и полевыми наблюдениями, может быть компенсирующая резкая подвижка Аравийской плиты в сторону Евразийской плиты в случае сброса энергии упругих напряжений при сильном землетрясении в зоне коллизии. Сброс энергии в случае средних по силе землетрясений, вероятно, может компенсироваться косейсмическими подвижками соседних микроплит [12]. Сброс энергии в случае слабых землетрясений, может быть компенсирован косейсмическим перераспределением упругих напряжений в очаговой зоне [3].

7. Спровоцированная сильным землетрясением компенсирующая подвижка Аравийской плиты навстречу Евразийской с передачей энергии от Аравийской плиты зоне коллизии способна инициировать афтершоки в очаге сильного землетрясения и повысить упругие напряжения в зоне коллизии по всему фронту движения Аравийской плиты.

8. Внезапное повышение упругих напряжений в зоне коллизии, вызванное движением Аравийской плиты навстречу Евразийской с передачей энергии от Аравийской плиты зоне коллизии, способно вызвать сжатие по всей зоне коллизии при каждом сильном сейсмическом событии и, соответственно, индуцировать соответствующие геофизические [2, 5, 13—15], геохимические [16—22], гидрогеодинамические [19, 23, 24] и другие аномалии [25—27], а также наводить новые землетрясения [28—30], т. е. форшоки и главные толчки, а также миграцию очагов сильных землетрясений вдоль активных разломов, в зависимости от уровня накопленных деформаций в каждой точке среды, на любом расстоянии от первичного очага землетрясения в пределах искомой зоны коллизии.

9. В случае, если предполагаемая гипотеза справедлива, то сильные землетрясения способны вызывать движение литосферных плит, а оно — сильные землетрясения. Таким образом, в природе, по-видимому, действует взаимообусловленная и взаимосвязанная цепь явлений: сильное землетрясение → движение плиты → сильное землетрясение → и т. д.

10. Возможная цепь взаимосвязанных и взаимообусловленных процессов, сильное землетрясение ⇔ движение плиты, может объяснить механизм многих пре-, ко-, постсейсмических явлений, которые не имели своего объяснения до сегодняшнего дня.

11. Известный механизм медленного накопления напряжений (деформаций) связан с медленным движением плит, вызываемым конвективными потоками в мантии. С другой стороны, возможно существует и быстрая компонента накопления, связанная с резкими подвижками литосферных плит, спровоцированными сбросом напряжений при сильных землетрясениях. При этом быстрая компонента может составлять до 11 % от общей годовой величины движения плит.

В заключение автор выражает благодарность проф. И. Чао, доктору Г. Войту и доктору Милкерайту (ГФЦ, Потсдам, Германия) за инициативу „READINESS“, техническую и финансовую поддержку, оказанную в ходе этой научной программы, а также за полезную научную дискуссию.

Автор благодарен также сотрудникам Армянской НССЗ (1991—2002 гг.) В. Игумнову, В. Хондаряну, Г. Петросяну, Р. Дургаряну, М. Енанову и многим другим за участие в полевых исследованиях и обработку полученных данных, а также сотрудникам офиса Армянской ассоциации сейсмологии и физики

ЛИТЕРАТУРА

1. **Modern Global Seismology** / Ed. Thorne Lay and C. Terry. Wollace, International geophysics series. California, Academic Press, 1995, v. 58, 517 p.
2. **Rikitake T.** Earthquake Prediction, Developments in Solid Earth. Geophysics Series, V. 9. Amsterdam, Elsevier Sci, 1976, 388 p.
3. **Kasahara K.** Earthquake Mechanics. Cambridge, Cambridge University Press, 1981, 246 p.
4. **Balassanian S.Yu.** The anomalies daily dynamics of local geophysical, and geochemical fields (ADF) effect study in connection with earthquake preparation and occurrence // Phys. Chem. Earth, 1999, v. 24, № 8, p. 741—752.
5. **Balassanian S.Yu.** Earthquake Prediction Research for Current Seismic Hazard Assessment // Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction / Ed. S. Balassanian et al. Amsterdam, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 169—209.
6. **Balassanian S.Yu.** Seismogenic and destructive earthquake in the Caucasus // Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. Amsterdam, Kluwer Academic Publisher, Series 2; Environment, 1997, v. 28, p. 1—37.
7. **Баласанян С.Ю.** Динамическая геоэлектрика. Новосибирск, Наука, 1990, 232 с.
8. **Zschau J., Woith H., Balassanian S.Yu.** READINESS: Realtime Data Information Network in Earth Science, 2nd Intern. Conf. on Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction (Yerevan, Armenia, September 15—21). Yerevan, Abstract volume, 1998, p. 210.
9. **Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И.** Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений // Моделирование предвестников землетрясений. М., Наука, 1980, с. 7—44.
10. **Агаловян Л.А., Геворкян Р.С., Асратян М.Г.** Об одной неклассической смешанной краевой задаче теории упругости для анизотропной полосы переменной ширины / Изв. НАН РА, Механика, 2003, № 2, с. 56—60.
11. **Reilinger R. McCluskey S., Souter B. et al.** Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements // Geophys. Res. Lett., 1997, v. 24, № 14, p. 1815—1818.
12. **Stein Ross S.** The role of stress transfer in earthquake occurrence // Nature, 1999, v. 402, p. 605—609.
13. **Zhang G. and Fu Z.** Some features of medium and short term anomalies before great earthquake // Maurice Ewing Ser., 1981, v. 4, p. 497—509.
14. **Mogi K.** Earthquake Prediction. New York, Academic Press, 1985, 355 p.
15. **Sobolev G.** Fundamentals of earthquake prediction. Moscow, Electromagnetic Research Centre, 1995, 250 p.
16. **Belyaev A.A., Igumnov V.A.** Method of analysis of geochemical oscillations to earthquake prediction // Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Amsterdam, Kluwer Academic Publishers, 2000, 231 p.
17. **Barsukov V.L., Belyaev A.A., Serebrennikov V.S. et al.** Possibility of use of statistical estimates of a helium content variability in thermal waters for the earthquake forecast // Geochemistry, 1982, v. 11, p. 1614—1620.
18. **Уломов В.И., Мавашев Б.З.** Предвестник сильного тектонического землетрясения // Докл. АН СССР, 1967, т. 176, с. 9—11.
19. **Wakita H., Nakamura Y. & Sano Y.** Short-term and intermediate-term geochemical precursors // Pure Appl. Geophys., 1988, v. 126, № 2—4, p. 267—278.
20. **Bergamo R., Gasparini P. & Veltri C.** Studies on radon anomalies related to earthquakes // Proc. Int. Conf. Geochem. Earth. Prediction (Palermo 1985—Italy), 1985, p. 45—50.
21. **Hauksson E.** Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwidedata and physical basis // J. Geophys. Res., 1981, v. 86, № B10, p. 9397—9410.
22. **King C.Y.** Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview // J. Geophys. Res., 1986, v. 91, p. 12269—12281.
23. **Lühr B., Westerhaus, Woith H. & Yatman A.** Temporal changes in various geoparameters accompanying seismic quiescence along a western part of the North-Anatolian fault // EUG8 (April 9—B, 1995, Strasbourg). Strasbourg, 1995, p. 8—11.
24. **Roeloffs E.A.** Hydrologic precursors to earthquakes: a review // Pure Appl. Geophys., 1988, v. 126, № 2—4, p. 177—209, Basel.
25. **Ding Jianhai, Chen Xuezhong, Liu Jie et al.** Earthquake prediction research in China: Zhangebei $M = 6,2$ earthquake on January 10, 1998 // Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction, 2000, p. 239—249.

26. **Chen Lide, Luo Ping, Cai Jingguan et al.** Medium-short term and impending prediction and precursory features of $M = 7,3$ earthquake occurred in Menglian county, Yunnan province // *Earthquake*, 1997, v. 17, № 1, p. 1—13.
27. **Hill D.P. Reasenberg P.A., Michael A. et al.** Seismicity remotely triggered by the Magnitude 7,3 Landers, California, earthquake // *Science*, 1993, v. 260, p. 1617—1623.
28. **Nikolaev A., Ruff L., Zimakov L.** Triggering of earthquake by earthquakes // *Earthquake Induced by Underground Nuclear Explosions, NATO ASI Series, 2 Environment*, 1995, v. 4, p. 75.
29. **Gomberg J.** Earthquake induced seismicity: evidence from the $M = 7,4$ Landers, earthquake and the geysers field // *Ibid.*, p. 201.
30. **Mansinha L. and Kamal K.** The triggering of aftershocks: Part 1, 2: A search for tidal periodicities in the 1989 Loma Prieta (California) aftershock sequence // *Ibid.*, p. 177—200.
31. **Woith H., Milkereit C., Zschau J. et al.** Thermal and mineral waters as natural strain sensors. XXVI ESC European Seismological Commission (Tel Aviv, Israel, August 23—28). Tel Aviv, Abstracts volume, 1998, p. 35.

*Рекомендована к печати 26 апреля 2004 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию
4 ноября 2003 г.*