

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.343.6

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О „ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗОНАХ“ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ФОРМИРОВАНИЕ
ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ**

И.Г. Киссин

Институт физики Земли РАН, 123995, Москва, Бол. Грузинская, 10, Россия

Подведены итоги исследований „чувствительных зон“ земной коры, выполненных за последние два десятилетия. В этих зонах проявляется особенно сильная реакция различных геофизических полей на изменения напряженно-деформированного состояния, наблюдаются высокоамплитудные и отдаленные предвестники землетрясений и постсейсмические эффекты. В настоящее время известны четыре „чувствительные зоны“: в Туркменистане, Узбекистане, Армении и Северо-Восточном Китае. Рассмотрено тектоническое положение таких зон, приуроченных к контактам крупных подвижных блоков земной коры. Формирование высокоамплитудных и отдаленных эффектов связано с деформациями межблоковых контактов и большой тензочувствительностью геофизических полей в таких контактах. На примере „чувствительных зон“ рассматривается влияние неоднородности среды и нелинейных процессов на эффекты в различных полях, связанные с землетрясениями. Влияние этих факторов проявляется и вне таких зон, поэтому должно учитываться при интерпретации предвестников землетрясений. Данные о „чувствительных зонах“ могут быть использованы для изучения динамики контактов между крупными блоками земной коры.

Земная кора, землетрясения, чувствительные зоны, предвестники, блоковая структура, межблоковые контакты.

**NEW DATA ON CRUSTAL SENSITIVE ZONES AND FORMATION OF PRECURSORS
AND POSTSEISMIC RESPONSES TO EARTHQUAKES**

I.G. Kissin

The paper summarizes twenty years of studies in crustal sensitive zones. Sensitive zones show prominent geophysical responses to stress and strain changes and high-amplitude and distant preseismic and postseismic effects. Four sensitive zones are known today in Turkmenistan, Uzbekistan, Armenia, and northeastern China, which occur at junctions of large crustal blocks. High-amplitude and distant responses are due to deformation and high strain sensitivity of geophysical parameters along block boundaries. Data from sensitive zones are used to investigate earthquake-related effects as controlled by crustal heterogeneity and nonlinearity. These effects act also outside sensitive zones and should be taken into account when interpreting precursor signals. The knowledge of sensitive zones has important implications for active deformation along block boundaries.

Crust, earthquake, sensitive zone, earthquake precursor, block structure, block boundary

ВВЕДЕНИЕ

Два десятилетия тому назад были впервые выделены „чувствительные зоны“ земной коры — области, где в различных геофизических полях* наблюдаются высокоамплитудные предвестники землетрясений и постсейсмические эффекты [Киссин, 1985]. В ходе исследований было установлено наличие нескольких „чувствительных зон“ на территории бывшего Советского Союза и Северо-Восточного Китая [Киссин, 1988; Kissin et al., 1993]. В этих зонах высокоамплитудные эффекты наблюдались на значительных (до 500 км и более) эпицентральных расстояниях в пунктах, расположенных вблизи крупных разломов и межблоковых границ. Было отмечено, что „чувствительные зоны“ принадлежат к наиболее динамичным элементам геофизической среды, которые отличаются неустойчивостью и нелинейными характеристиками, проявляющимися в реакциях на внешние воздействия. Их свойства тесно связаны с механизмом самоорганизации систем блоков [Садовский, 1986].

* Под этим термином мы объединяем собственно геофизические, геохимические и гидродинамические поля.

В статье С.Ю. Баласаняна [2005] дано описание еще одной подобной зоны, выделенной в Южной Армении. Таким образом, было подтверждено высказанное ранее предположение, что «по мере развития наблюдательных сетей география „чувствительных зон“ будет расширена» [Киссин, 1988, с. 11]. В статье [Баласанян, 2005] отсутствуют упоминания об истории вопроса, в частности, о концепции геофизической среды М.А. Садовского [1984]. Вероятно, автор не был знаком с более ранними работами в данной области [Киссин, 1985, 1988; Kissin et al., 1993; и др.], поэтому в указанной статье пишет об открытии им „явления высокочувствительных энергоактивных точек Земли“. Именно под таким названием фигурирует зона, выделенная в Южной Армении, которая по своим характеристикам полностью соответствует понятию „чувствительной зоны“ земной коры.

К настоящему времени накоплены обширные данные о распространении “чувствительных зон” в разных регионах, реакциях геофизических полей на возмущения, связанные с различными стадиями сейсмического процесса (пред-, ко- и постсейсмические эффекты). Наибольший объем наблюдений, в результате которых обнаружены аномально высокие по амплитуде или эпицентральному расстоянию эффекты, был выполнен по гидрогеодинамическим предвестникам землетрясений. Однако, как будет показано ниже, имеющиеся данные свидетельствуют, что такие аномалии выявлены и по другим геофизическим полям. В ряде случаев они относятся не только к предвестникам, но и к постсейсмическим эффектам.

Обобщение и анализ всех этих данных могут представлять интерес для дальнейшего познания динамики блочной геофизической среды и совершенствования методов исследований эффектов, связанных с землетрясениями, прежде всего предвестников землетрясений.

ВЫСОКОАМПЛИТУДНЫЕ И ОТДАЛЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ, ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ В РАЗНЫХ „ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗОНАХ“ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Попытки определения зависимостей между амплитудами сигналов-предвестников землетрясений по различным геофизическим полям и эпицентральному расстояниям указывают на большой разброс данных [Соболев, 1993]. Нарушения корреляции между этими показателями наиболее резко выражены при наличии высокоамплитудных и отдаленных предвестников, а также постсейсмических эффектов. К высокоамплитудным эффектам отнесены предшествующие и вызванные землетрясениями изменения показателей, у которых отклонения от фоновых значений на 1—2 порядка выше, чем амплитуда преобладающего количества подобных эффектов [Киссин, 1985, 1988]. Необходимо также ввести понятие „отдаленные эффекты землетрясений“. Они представлены эффектами, которые наблюдаются за пределами зоны, где расчетные деформации при подготовке или вследствие землетрясения превышают 10^{-8} , т. е. величину земноприливных деформаций. Чтобы оценить величину деформаций ε при подготовке землетрясений, можно воспользоваться зависимостью [Добровольский, 1984]

$$\varepsilon = \left[\frac{10^{0.413M - 2.66}}{R} \right]^3, \quad (1)$$

где M — магнитуа землетрясения, R — эпицентральное расстояние, км.

Применительно к высокоамплитудным и отдаленным эффектам мы рассматриваем предвестники землетрясений, а также постсейсмические изменения тех или иных показателей. Эффекты эти являются результатом изменений напряженно-деформированного состояния среды до или вследствие сейсмических событий. Воздействия сейсмических волн, генерируемых очагом землетрясения, сопровождаются кратковременными косейсмическими эффектами. Волновые воздействия, а также деформации в очаге землетрясения могут оказывать влияние на поле напряжений—деформаций, и в этом случае остаточные последствия таких воздействий образуют постсейсмические эффекты.

Высокоамплитудные и отдаленные эффекты землетрясений были обнаружены в „чувствительных зонах“ земной коры [Киссин, 1985, 1988]. К последним следует относить области, где проявляется особо сильная реакция геофизических полей на воздействия, вызванные подготовкой и последствиями землетрясений. Необходимо подчеркнуть, что для характеристики „чувствительных зон“ земной коры одинаково важны результаты наблюдений как за предвестниками, так и за постсейсмическими эффектами. И те, и другие тесно связаны между собой и отражают изменения в геофизических полях, связанные с деформациями среды на различных стадиях сейсмического процесса.

Нами изучались преимущественно гидрогеодинамические предвестники — эффекты, которые регистрируются обычно по изменениям уровня или давления подземных вод. Наблюдения за такими предвестниками широко используются в практике прогностических исследований. Для гидрогеодинамических предвестников достаточно полно разработаны способы учета и устранения помех, определения деформационной составляющей и влияния тензочувствительности в вариациях показателей [Киссин, 1993]. На рис. 1 приведена гистограмма амплитуд гидрогеодинамических предвестников сильных землетрясений, зафиксированных по изменениям уровня подземных вод. Амплитуды сигналов-предвестников

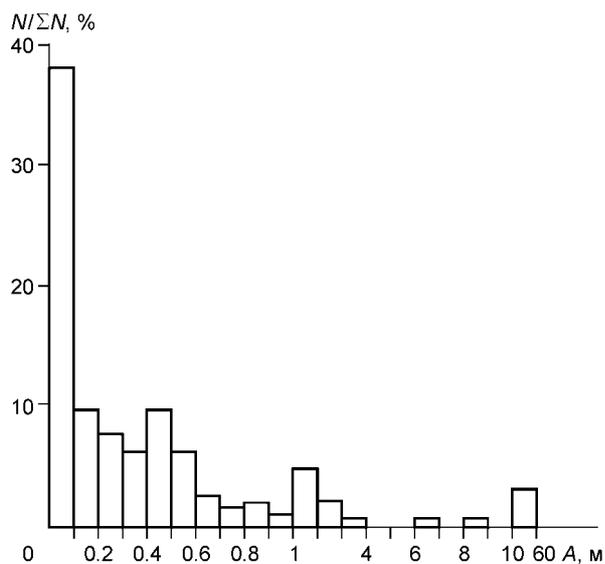


Рис. 1. Гистограмма амплитуд гидрогеодинамических эффектов-предвестников.

определялись как отклонение показателей от фоновых значений, которые характерны для вариаций уровня в сейсмически спокойные периоды. Были использованы данные наблюдений, выполненных с участием автора, а также опубликованные материалы [Roeloffs, 1988; Kissin et al., 1993, 1996; Kissin, Grinevsky, 1990; King et al., 1999; и др.]. Всего было отобрано эффектов-предвестников 181, которые относились к 112 землетрясениям с магнитудой (M) от 4.5 до 7.8. Как видно из гистограммы, амплитуды большей части эффектов (55.7 %) не превышали 0.3 м. Следовательно, в качестве высокоамплитудных можно рассматривать эффекты с изменениями уровня подземных вод 3 м и более. Количество таких эффектов составляет 6.2 % от их общей суммы.

Подобные высокоамплитудные предвестники были зарегистрированы по вариациям уровня подземных вод на участках, расположенных в трех сейсмоактивных регионах — Прикопетдагской зоне Туркменистана, Восточной Фергане (Узбекистан) и в Северо-Восточном Китае. Эти участки были отнесены к „чувствительным зонам“ земной коры [Киссин, 1985]. Данные о высокоамплитудных эффектах землетрясений в указанных регионах, а также в Армении приведены в таблице.

Прикопетдагская зона. В этой зоне высокоамплитудные вариации уровня воды, которые в пяти случаях предшествовали и в одном сопутствовали землетрясениям, наблюдались по скважинам, расположенным в непосредственной близости от Главного Копетдагского разлома (рис. 2). Было установлено, что данные вариации не связаны с воздействием гидрометеорологических или техногенных факторов, а являются реакцией подземных вод на геодинамические процессы. В районе г. Ашхабад крупная аномалия уровня подземных вод с общей амплитудой 15.6 м (рис. 3, а) была зарегистрирована на скв. 2г перед Газлийскими землетрясениями 08.04.1976 г. с $M = 7.0$ и 17.05.1976 г. с $M = 7.3$ [Киссин, 1988]. Расстояние от скважины до эпицентров землетрясений около 560 км. Аналогичная картина наблюдалась и перед землетрясениями 18.08.1990 г., 30.08.1990 г. и 09.09.1990 г., из которых два последних имели близкие эпицентры (см. рис. 2, 3, б).

Резкое изменение уровня воды на скв. Джанахир-3в совпадает по времени с роем землетрясений, которые произошли 17—18.08.1988 г. на территории Ирана, в районе г. Боджнурд, на удалении от скважины около 220 км. В этот период была зафиксирована серия толчков, максимальная магнитуда которых достигала 4.7. Аномальная вариация уровня воды (его быстрое падение на 11.4 м, затем подъем на 1.3 м) началась одновременно с наиболее сильным толчком роя и является реакцией на землетрясения. Подобная реакция необычна и, насколько известно автору, ранее не встречалась. Ее особенности — большая амплитуда изменения уровня, который в течение длительного периода последующих наблюдений не вернулся к исходному положению, сравнительно невысокие магнитуды землетрясений роя и значительное удаление наблюдательной скважины от эпицентров. Можно полагать, что механизм этой аномалии сходен с механизмом высокоамплитудных предвестников землетрясений [Kissin et al., 1993].

По скв. Казанджик-1гс, положение которой в геологическом разрезе показано на рис. 4, а, было зарегистрировано два высокоамплитудных эффекта, предшествующих землетрясениям со сравнительно небольшими магнитудами — 5.0 и 5.4 (см. рис. 4, б). Перед вторым землетрясением уровень воды снизился на 57 м, и это снижение оказалось необратимым. Столь значительная амплитуда гидрогеодинамического предвестника прошла тщательную проверку (вплоть до бурения дополнительной скважины) и представляет собой уникальное явление, которое в мировой практике нигде более не встречалось [Киссин и др., 1990]. Природа этого эффекта будет рассмотрена ниже.

В Прикопетдагской зоне значительные амплитуды эффектов-предвестников наблюдались перед некоторыми землетрясениями и по другим геофизическим полям. Например, здесь отмечены аномалии наклонов земной поверхности до 2'', неприливных изменений силы тяжести до 0.1 мГал, изменений разностей геомагнитных полей до 24 нТл [Современные движения..., 1983]. В ряде случаев предвестники, зарегистрированные в Прикопетдагской зоне, предшествовали не местным, а удаленным на несколько сотен километров землетрясениям.

Ферганская зона. В Восточной Фергане большие аномалии уровня подземных вод, наблюдались в районе г. Андижан [Султанходжаев и др., 1986]. Повышение уровня на скв. Андижан-1 перед Джиргаталь-

Основные характеристики связанных с землетрясениями высокоамплитудных вариаций уровня, дебита и температуры подземных вод

Местоположение и номер скважины [ссылка]	Глубина фильтра или открытого ствола, м	Время вариаций	Амплитуда вариаций уровня (H), дебита (Q), температуры воды (T)	Характер вариаций	Дата землетрясения	Магнитуда	Эпицентральное расстояние, км
Прикопетагская зона							
Нижняя Фирюза-2г [Kissin et al., 1993]	57—1210	31.08.1975—20.04.1976	$H = 7.2$ м	Резкое падение с частичным восстановлением	08.04.1976	7.0	560
»	»	25.04.1976—27.10.1976	$H = 8.4$ м	Резкое падение с восстановлением	17.05.1976	7.3	560
»	»	28.07.1990—18.08.1990	$H = 15.2$ м	Резкое, затем постепенное падение без восстановления	18.08.1990 30.08.1990 09.09.1990	5.7 5.1 5.6	220 90 90
Джанахир-3в [Kissin et al., 1993]	1300—1600	16.08.1988—17.08.1988	$H = 11.4$ м	Резкое падение с частичным восстановлением	16—17.08.1988	4.7	200
Казанджик-1гс [Киссин и др., 1990]	513—958	11.12.1986—08.01.1987	$H = 8.6$ м	Падение с восстановлением	26.12.1986	5.0	220
»	»	18.01.1987—07.09.1987	$H = 57.0$ м	Падение без восстановления	07.09.1987	5.4	70
Ферганская зона							
Андижан-1 [Султанходжаев и др., 1986]	550	24.10.1984—27.10.1984	$H = 16$ м	Пиковый подъем и снижение уровня	26.10.1984	6.4	180
Ходжабад-745 [Мавлянов и др., 1981]	1860	28.09.1978—02.11.1978	Q от 12 до 0 л/с	Прекращение и восстановление излива воды	02.11.1978	6.8	160
Армения							
Каджаран [Баласаян, 2005]	—	15.03.1999—20.11.1999	$Q = 2.1$ л/с	Подъем, скачок и снижение дебита	17.08.1999	7.4	1380
Северо-Восточный Китай							
Юе-42 [Kissin et al., 1993]	540—707	21.05.1976—28.07.1976	$H > 10$ м	Снижение уровня с последующим резким повышением и изливом	28.07.1976	7.8	12
Ксюн-3 [Kissin et al., 1993]	974—1020	20.05.1976—24.05.1976 20.07.1976—01.08.1976	$T = 5.2$ °C $T = 5.4$ °C	Резкое снижение и восстановление температуры	28.07.1976	7.8	200
Мо-1 [Kissin et al., 1993]	3173—3184, 3341—3343	21.07.1976—27.07.1976	$H = 20$ м	Внезапный фонтан нефти	28.07.1976	7.8	240
Дин-8-1 [Kissin et al., 1993]	146—293	03.03.1988—15.11.1989	$H = 6.7$ м	Быстрое снижение уровня с более медленным подъемом	19.10.1989	5.8	370

ским землетрясением 26.10.1984 г. с $M = 6.4$ в Южном Тянь-Шане здесь составило 8.3 м. После землетрясения подъем уровня продолжался, и общая амплитуда достигла 16 м (рис. 5). На другой скважине уровень за день до этого землетрясения поднялся почти на 3 м. Землетрясению предшествовали также резкие изменения содержания растворенных в воде углекислоты и радона. На нефтяном месторождении Южный Аламышик вблизи Андижана перед землетрясением начался излив нефти из скважин, в которых ранее она добывалась насосным способом. Расстояние от Андижана до эпицентра около 180 км. Снижение уровня подземных вод и прекращение самоизлива скважин наблюдалось перед Алайским землетрясением с $M = 6.8$, которое произошло 02.11.1978 г. на расстоянии 160 км [Мавлянов и др., 1981]. Этому землетрясению предшествовала также аномалия разностей геомагнитных полей 23 нТл. Значительные магнитные эффекты наблюдались здесь и перед другими отдаленными сильными землетрясениями.

Северо-Восточный Китай. Высокоамплитудные предвестники были зарегистрированы перед двумя сильными землетрясениями — Таншаньским 28.07.1976 г. $M = 7.8$ и Датунским 19.10.1989 г. с $M = 5.8$ [Kissin et al., 1993]. Расположение эпицентров землетрясений, а также наблюдательных скважин показано на рис. 6. Эти эффекты, которые определялись по вариациям уровней воды, нефти и температуры воды,

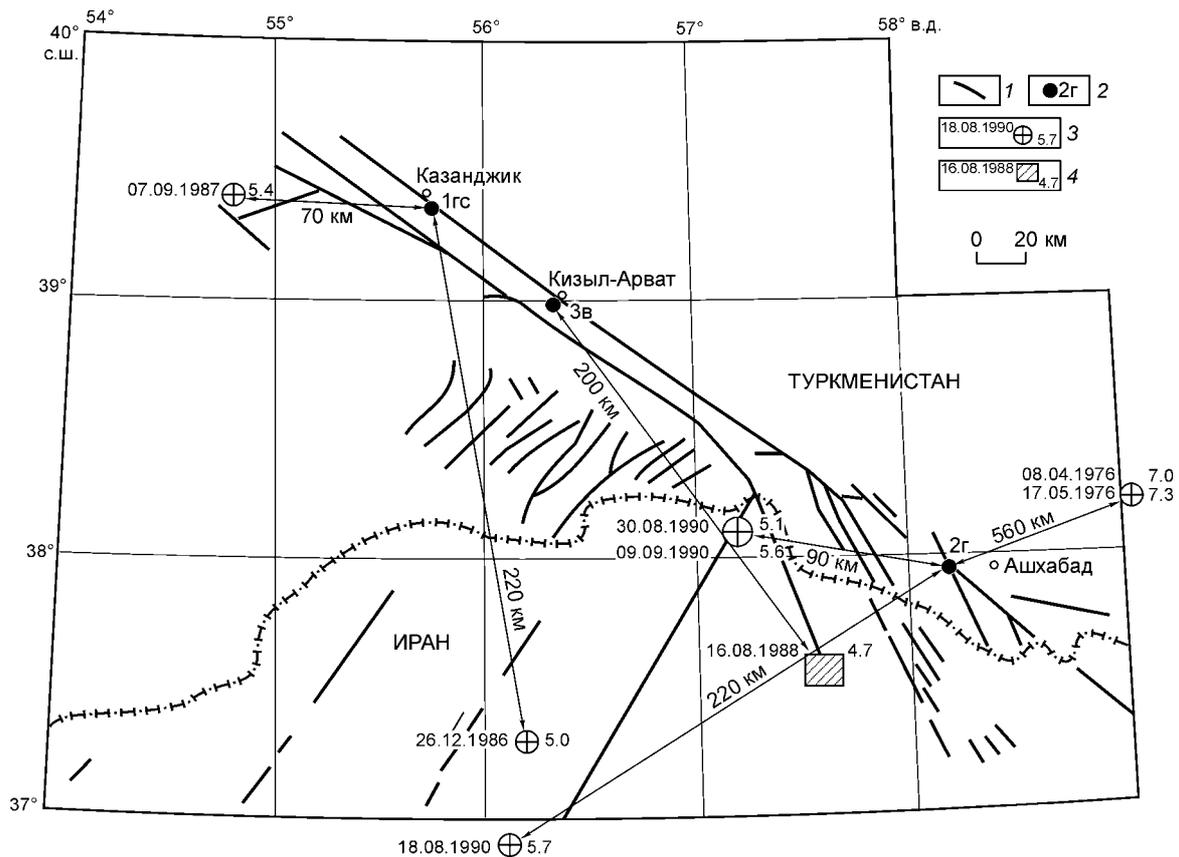


Рис. 2. Схематическая карта Прикопетдагской „чувствительной зоны“.

1 — глубинные разломы (по материалам В.Н. Крымуса и М. Берберьяна); 2 — наблюдательная скважина и ее номер; 3 — эпицентр землетрясения, его дата и магнитуда; 4 — эпицентр Божнурдского роя землетрясений, дата и магнитуда наиболее сильного толчка.

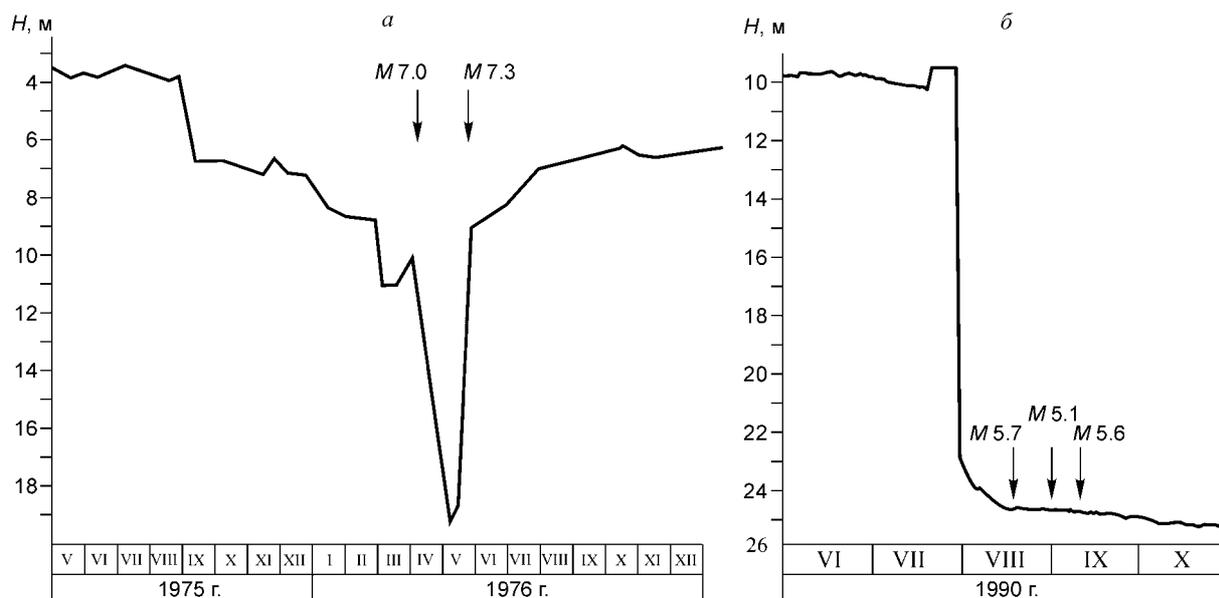


Рис. 3. Изменения уровня подземных вод по скв. 2г до и после землетрясений.

а — Газлийских (08.04.1976 г. и 17.05.1976 г.); б — на территории Ирана (18.08.1990 г., 30.08.1990 г. и 09.09.1990 г.).

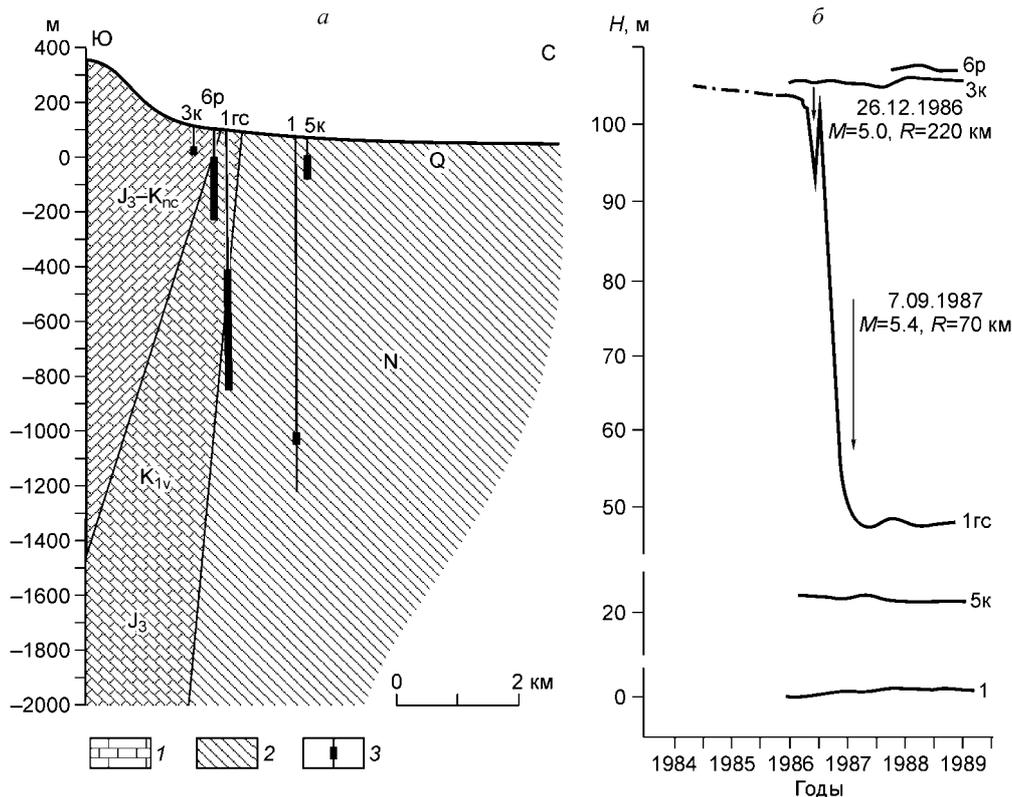


Рис. 4. Геологический разрез зоны Главного Копетдагского разлома в районе Казанджика и изменения уровня подземных вод по наблюдательным скважинам в 1985—1989 гг.

a — геологический разрез: 1 — известняки, 2 — песчано-глинистые отложения, 3 — положение фильтра или открытого ствола скважины; *б* — графики уровня подземных вод до и после землетрясений.

не связаны с влиянием гидрометеорологических факторов или деятельности человека. По скв. Юе-42 уровень воды перед Таншаньским землетрясением 28.07.1976 г. снижался, с середины мая 1976 г. скорость снижения возросла, а 23.07.1976 г. начался подъем уровня, который резко усилился за 2 ч до толчка (рис. 7, *a*). При этом произошел самоизлив воды, что соответствует повышению уровня более чем на 10 м.

На скв. Ксюн-3 при фоновой температуре изливающейся воды около 71 °С отмечены перед Таншаньским землетрясением два резких снижения температуры с амплитудами 5.2 и 5.4 °С. Минимумы температур были зафиксированы 21.05.1976 г. и 26.07.1976 г. (см. рис. 7, *б*). Примечательно, что несмотря на большие расстояния между скв. Юе-42 и Ксюн-3 и различие наблюдавшихся показателей, обе характерные точки изменений уровня и температуры близки по времени. Возможно, этот факт является отражением определенных стадий деформаций среды при подготовке Таншаньского землетрясения.

На нефтяной скв. Мо-1, где добыча не производилась из-за малого притока нефти, отмечено ее фонтанирование перед Таншаньским землетрясением: 21.07.1976 г. из скважины внезапно вырвалась струя нефти, которая поднялась на высоту около 20 м. Фонтанирование сопровождалось сильным шумом и продолжалось с перерывами до

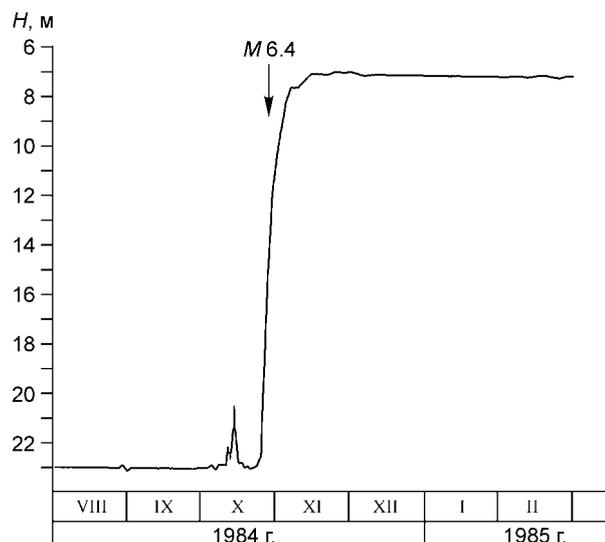


Рис. 5. Изменения уровня подземных вод в скв. Анджан-1 перед Джиргатайским землетрясением 26.10.1984 г. [Султанходжаев и др., 1986].

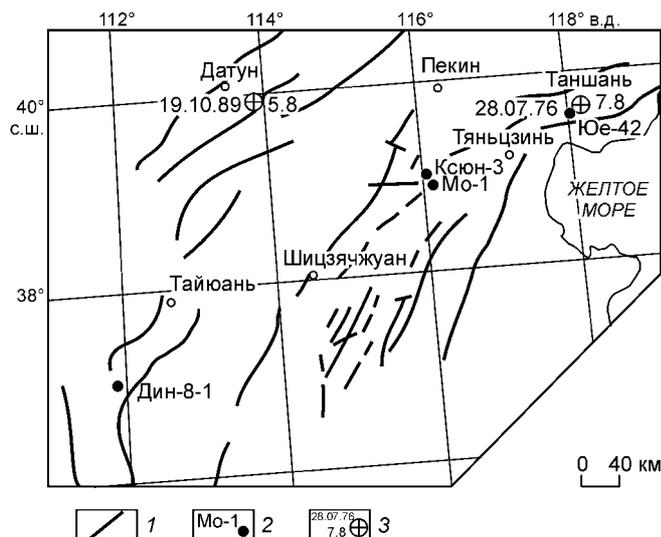


Рис. 6. Схематическая карта „чувствительной зоны“ в Северо-Восточном Китае [Kissin et al., 1993].

1 — глубинные разломы; 2 — наблюдательная скважина и ее номер; 3 — эпицентр землетрясения, его дата и магнитуда.

27.07.1976 г. При этом излилось около 2 т нефти. Подобные излияния происходили также перед некоторыми сильными афтершоками этого землетрясения. Перед Таншаньским землетрясением 28.06.1976 г. наблюдались высокоамплитудные вариации показателей не только флюидного режима, но и некоторых геофизических полей. Так, в районе Таншаня были зафиксированы вертикальные смещения по разлому до 7.2 мм, непривинные изменения силы тяжести до 0.19 мГал, повышение температуры

почвы на глубине 0.8 м на 1.6 °С [Mei Shirong, 1984].

Датунскому землетрясению 19.09.1989 г. предшествовали высокоамплитудные вариации уровня воды в скв. Дин-8-1, удаленной на 370 км от эпицентра. Эта аномалия развивалась длительное время — более 1.5 лет. Она несколько необычна по форме — довольно быстрое снижение, затем медленное повышение уровня воды (рис. 8).

Центральная и Южная Армения. Среди зарегистрированных в Армении высокоамплитудных эффектов землетрясений преобладают постсейсмические эффекты, имеются также данные о предвестниках землетрясений, которые наблюдались на значительных эпицентральных расстояниях. Связанные с землетрясениями высокоамплитудные и отдаленные эффекты в режиме флюидов были зафиксированы в Центральной Армении, на курорте Арзни, и в южной ее части (Каджаран). Землетрясение 24.11.1976 г. в районе оз. Ван (Турция) с магнитудой 7.5 проявлялось в Арзни на расстоянии от эпицентра 160 км с

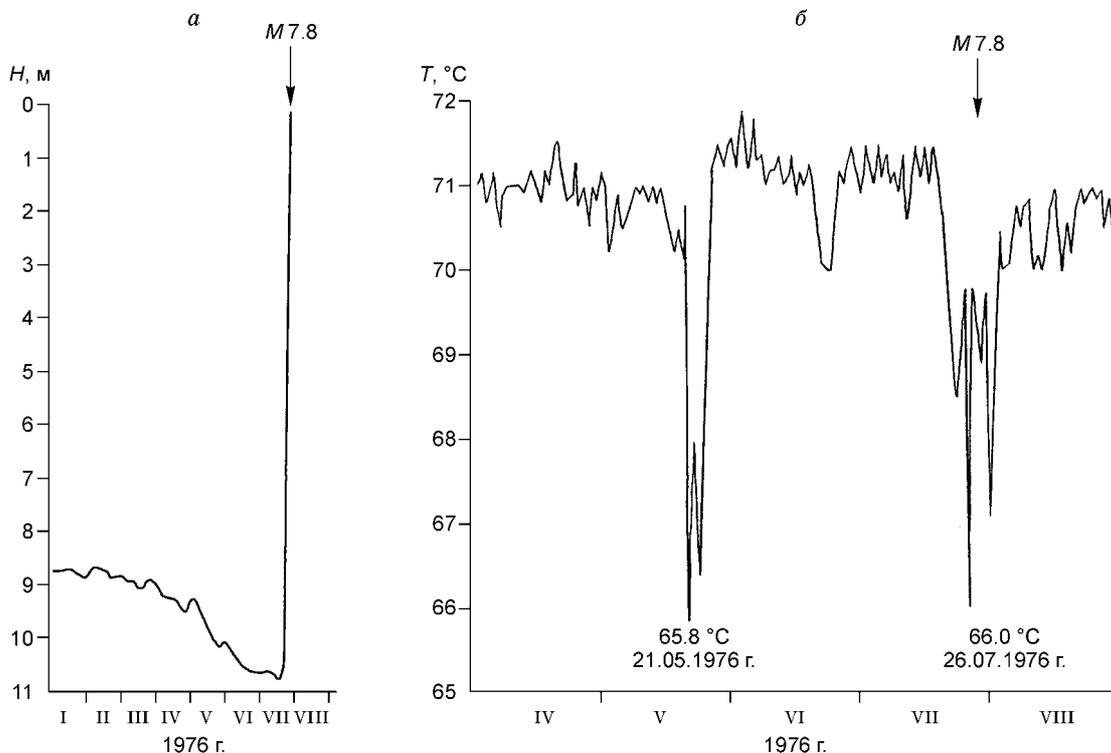
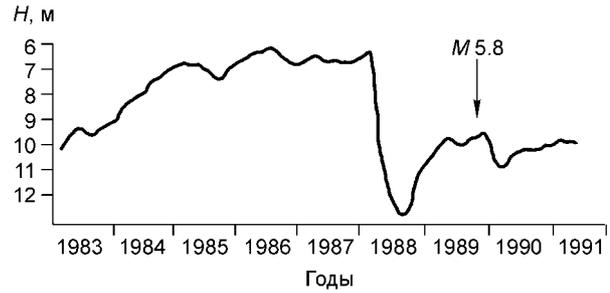


Рис. 7. Изменения показателей подземных вод перед Таншаньским землетрясением 28.07.1976 г. [Kissin et al., 1993].

а — вариации уровня воды по скв. Юе-42; б — вариации температуры воды по скв. Ксюн-3.

Рис. 8. Длительные вариации уровня воды по скв. Дин-8-1 [Kissin et al., 1993].



интенсивностью 4—5 баллов, что не должно было вызвать существенных гидрогеологических эффектов. Однако после землетрясения произошли сильные изменения в режиме углекислых минеральных вод: повысился их напор и дебит, увеличилась в 2—2.5 раза минерализация. Это объясняется открытием новых трещин, что усилило поступление глубинных вод [Арбузов и др., 1979].

На основе наблюдений, выполненных в районе Каджарана, этот объект получил название „высоко-чувствительной энергоактивной точки Земли“ [Баласаян, 2005]. В качестве доказательства высокой чувствительности „энергоактивной точки“ приведены данные о земноприливных вариациях показателей подземных вод. Но такие вариации не являются свидетельством высокой чувствительности. Они были изучены еще в середине прошлого века [Мельхиор, 1968] и неоднократно регистрировались во многих не только тектонически-активных, но и стабильных областях. В Каджаране наблюдались большие изменения растворенного в воде гелия, сопровождавшие сильные землетрясения, удаленные на многие сотни километров от этого пункта, причем по другим пунктам наблюдений в Армении такие эффекты не отмечались.

Представляют интерес наблюдавшиеся по скважине в Каджаране изменения „количества воды“ (очевидно, имеется в виду дебит) и ее электропроводимости до и после Измитского землетрясения в Турции 17.08.1999 г. с $M = 7.4$ на эпицентральной расстоянии 1380 км. Изменения дебита подземных вод начались в середине марта 1999 г., т. е. за 5 месяцев до землетрясения (рис. 9, таблица). Перед землетрясением дебит вырос на 1.3 л/с, косейсмический скачок дебита составил еще 0.8 л/с, затем произошло постсейсмическое уменьшение дебита до исходных значений, которое продолжалось около трех месяцев. Были также зафиксированы четкие изменения проводимости воды до, в момент и после землетрясения (см. рис. 9).

С учетом столь большого удаления от эпицентра такие эффекты, бесспорно, указывают на высокую чувствительность структуры в Каджаране. Связь этих эффектов с землетрясением подтверждается косейсмическим скачком и возвратным изменением дебита после землетрясения. Подобные отдаленные эффекты автор статьи [Баласаян, 2005] связывает с воздействием сжатия на систему разломов, пересе-

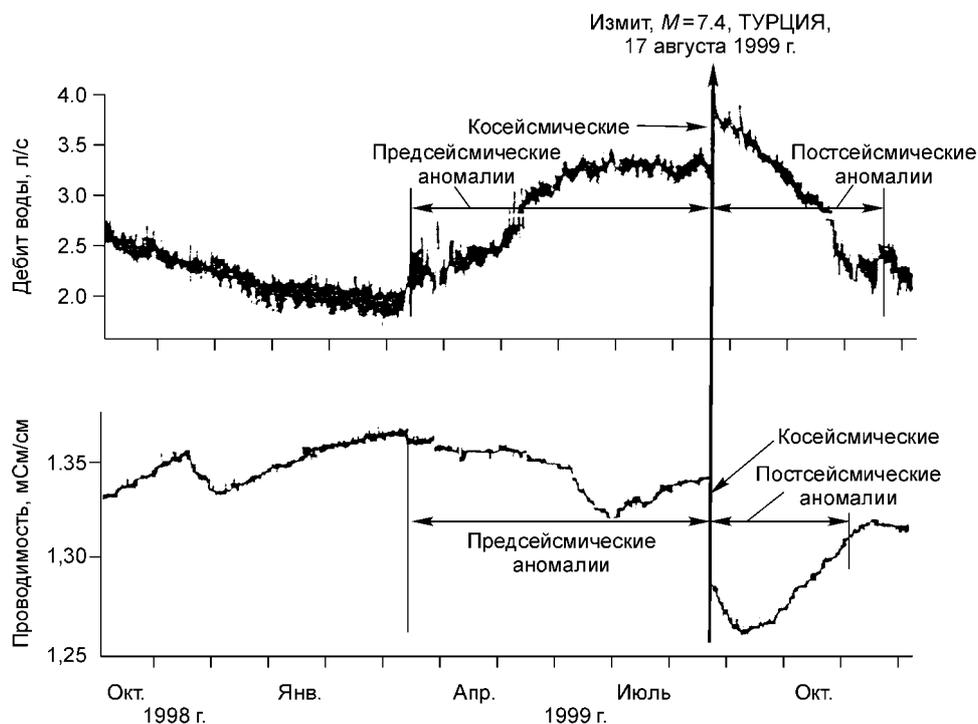


Рис. 9. Изменения дебита и электропроводимости подземных вод по скв. Каджаран до, в момент и после Измитского землетрясения на эпицентральной расстоянии 1380 км [Баласаян, 2005].

каемых скважиной, что приводит к изменению притока воды, поступающей в скважину из разных участков разреза. Такое же объяснение было нами дано ранее для эффектов, обнаруженных в Прикопетдагской зоне Туркменистана [Киссин, 1988]. Возможно, что ко- и постсейсмические изменения дебита воды на скв. Каджаран также связаны с выделением свободного газа при прохождении сейсмических волн [Wang et al., 2004]. Но этот механизм не мог привести к предсейсмическому увеличению дебита воды в течение пяти месяцев. Такое увеличение, как и последующее снижение дебита, несомненно обусловлены деформационными процессами.

При выяснении особенностей „чувствительных зон“ земной коры необходимо определить, не является ли особо сильная реакция различных геофизических полей на возмущения напряженно-деформированного состояния (высокоамплитудные и отдаленные эффекты) неизменным признаком любой сейсмоактивной области. Многочисленные данные о характере предвестников и постсейсмических эффектов по различным регионам позволяют ответить на этот вопрос отрицательно: в ряде высокосейсмичных областей такие аномальные эффекты не наблюдались; более того, даже в „чувствительных зонах“ значительная часть зарегистрированных эффектов имеет сравнительно невысокие „нормальные“ амплитуды. Чтобы это подтвердить, приведем некоторые примеры.

На Гармском полигоне (Таджикистан), где длительные наблюдения за уровнем подземных вод велись по шести скважинам, были обнаружены краткосрочные предвестники двух землетрясений — Петровского 26.02.1983 г. с $M = 5.2$ и Джиргатальского 26.10.1984 г. с $M = 6.4$. Достаточно уверенных определений средне- и долгосрочных предвестников не было [Боканенко и др., 1999]. При эпицентральных расстояниях от 13 до 40 км амплитуда изменений уровня до Петровского землетрясения составляла 2—8 см, а в момент землетрясения не превышала 32 см. Перед упомянутым Джиргатальским землетрясением изменение уровня на 3 см было зафиксировано лишь по одной скважине на эпицентральной дистанции 75 км, а на более близкой скважине отсутствовало. (Сравним эти цифры с приведенными выше данными об удаленном эффекте Джиргатальского землетрясения, достигавшем 16 м по Ферганской „чувствительной зоне“.)

В Центральной Японии наблюдения по группе скважин показали, что связанные с сильными землетрясениями изменения уровня воды не превышали 0.5 м и лишь по одной скважине снижение уровня, начавшееся до землетрясения, продолжалось после него с большей амплитудой [King et al., 1999]. Имеющиеся данные не позволяют выделить здесь „чувствительную зону“. Высокоамплитудные или отдаленные гидрогеодинамические предвестники и постсейсмические эффекты не были зарегистрированы в таких высокосейсмичных регионах, как Камчатка [Копылова, Серафимова, 2004] и Калифорния [Roeloffs, 1998]. Наконец, в пределах Копетдагской „чувствительной зоны“ по большому числу скважин были зарегистрированы многочисленные краткосрочные предвестники землетрясений со сравнительно небольшими (до 1 м) амплитудами изменений уровня воды [Kissin et al., 1996].

СТРУКТУРЫ „ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗОН“ ЗЕМНОЙ КОРЫ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОАМПЛИТУДНЫХ И ОТДАЛЕННЫХ ЭФФЕКТОВ

Проявления эффектов, связанных с землетрясениями, зависят от двух факторов: напряженно-деформированного состояния среды при подготовке землетрясения и после него и тензочувствительности — механизма воздействия деформаций среды на то или иное поле. Применительно к ко- и постсейсмическим эффектам необходимо учитывать влияние вибросенситивности — изменений в геофизических полях, вызванных прохождением сейсмических волн. Под воздействием сейсмических волн может произойти разрядка существующих в массиве напряжений, что приведет к остаточным изменениям структуры среды и соответствующей реакции геофизических полей. Такие остаточные изменения в водо- и нефтенасыщенной среде под действием сейсмических волн изучались с использованием мощных вибрационных источников [Барабанов и др., 1987]. При этом было установлено сходство наблюдавшихся изменений с эффектами от удаленных сильных землетрясений, например Аляскинского 27.03.1964 г. с $M = 8.4$. С подобным механизмом, очевидно, связаны упоминавшиеся выше постсейсмические эффекты в системе минеральных вод Арзни в Армении.

Для рассматриваемых „чувствительных зон“ земной коры характерна определенная общность тектонического положения: они расположены на сочленениях более или менее крупных структур с различным строением и разнонаправленными новейшими движениями. В таких областях наблюдается высокая концентрация напряжений в земной коре.

Прикопетдагская зона протягивается с запад-северо-запада на восток-юго-восток вдоль северной окраины Копетдага (см. рис. 2). Эта зона, где сосредоточены эпицентры многих сильных землетрясений, тяготеет к Главному Копетдагскому разлому, отделяющему альпийскую складчатую область Копетдага от эпигерцинской Туранской платформы. Ферганская зона приурочена к Южно-Ферганской флексуно-разрывной структуре, по которой проходит граница между прогибающейся центральной частью Ферганской впадины и интенсивно поднимающейся Южно-Ферганской группой складок. На участках конт-

растных движений флексурно-разрывной структуры происходило большое количество землетрясений, в том числе сильных, например Андижанское землетрясение 16.12.1902 г. с $M = 6.4$. Наблюдательные скважины в Северо-Восточном Китае, где были зафиксированы высокоамплитудные эффекты, расположены в пределах двух крупных зон разломов, имеющих юго-западное и юго-юго-западное простирание (см. рис. 6). Эти зоны отличаются высокой сейсмической активностью, к ним приурочены эпицентры Таншаньского 1976 г., Датунского 1989 г., а также ряда других сильных землетрясений. Район Таншаньского землетрясения 1976 г. согласно схеме новейших тектонических движений Китайской платформы находится на стыке областей больших опусканий и умеренных поднятий [Белоусов, Шолпо, 1985]. Район Каджарана в Южной Армении подвержен влиянию коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит, и в этом районе проявляются сжимающие напряжения [Баласаян, 2005].

Высокоамплитудные или отдаленные эффекты землетрясений могут образоваться под воздействием сильных напряжений и соответствующих деформаций и(или) высокой тензочувствительности. В „чувствительных зонах“ земной коры наблюдаются эти условия. Согласно приведенной выше формуле (1), в эпицентральной зоне Таншаньского землетрясения на участке скв. Юе-42 деформации перед толчком могли иметь порядок 10^{-4} . Для двух других скважин Ксюн-3 и Мо-1, по которым наблюдались высокоамплитудные предвестники этого землетрясения (см. таблицу), расчетные деформации несколько превышали величину 10^{-6} . По скв. Нижняя Фирюза-2г перед землетрясением 09.09.1990 г. с $M = 5.6$ и Казанджик-1гс перед землетрясением 07.09.1987 г. с $M = 5.4$ такие деформации составляли 10^{-7} .

Во всех остальных случаях высокоамплитудных эффектов, приведенных в таблице, расчеты показывают величины деформаций меньшие, чем деформации, вызванные земными приливами (10^{-8}) или близкие к этому значению. Такие деформации могут вызвать лишь слабую реакцию подземных вод. Приведенные оценки показывают, что в большинстве рассмотренных случаев высокоамплитудные эффекты могли образоваться только при деформациях, значительно больших, чем расчетные. Эти деформации должны были действовать в зонах разломов, где расположены наблюдательные скважины. Ранее было изучено влияние крупного регионального разлома на гидрогеологические эффекты геодинамических процессов [Киссин и др., 1992]. На примере Главного Копетдагского разлома в Туркменистане установлено существенное влияние разлома на земноприливные колебания уровня подземных вод и краткосрочные вариации уровня, преимущественно связанные с землетрясениями. По мере удаления скважин, вскрывающих трещиноватые породы, от осевой части разлома уменьшались максимальные амплитуды земноприливных колебаний уровня, общее количество и амплитуды зарегистрированных краткосрочных вариаций (рис. 10). Полученные данные соответствуют результатам непосредственных измерений земноприливных деформаций и наклонов, которые показывают, что в зонах разломов значения этих показателей могут быть в 3—3.5 раза больше, чем внутри блоков [Латынина, Шишкина, 1978].

Приведенные данные по Прикопетдагской и другим „чувствительным зонам“ свидетельствуют, что эти зоны принадлежат к подвижным контактам крупных блоков, испытывающим большие деформации. При достаточной степени изученности таких зон (например Прикопетдагской) в них могут быть выделены участки с высокой степенью подвижности и относительно стабильные. Высокие деформации межблоковых промежутков находят свое объяснение с позиций механики блочного горного массива, наличия свободных блоков, способных перемещаться относительно массива [Кочарян, Спивак, 2003]. Эти перемещения происходят за счет разделяющих такие блоки разломов—прослоек меньшей прочности либо с повышенной трещиноватостью и пористостью. Межблоковые разломы отличаются

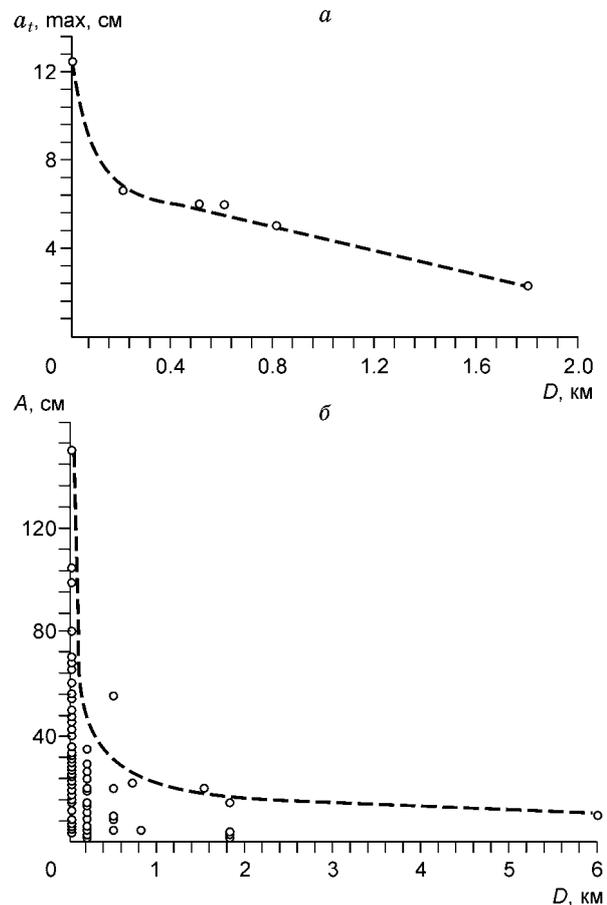


Рис. 10. Зависимости максимальных амплитуд земноприливных колебаний уровня подземных вод (а) и амплитуд краткосрочных вариаций уровня (б) от расстояний до тектонических нарушений зоны Главного Копетдагского разлома.

нелинейностью деформационных характеристик при малых амплитудах воздействия [Костюченко и др., 2002]. Они способны трансформировать, усиливать и излучать энергию внутренних и внешних источников.

Тензочувствительность является важным фактором, влияющим на формирование связанных с землетрясениями эффектов, которые наблюдаются в различных геофизических полях. Особенно велика роль тензочувствительности в проявлениях высокоамплитудных и отдаленных эффектов. Впервые влияние тензочувствительности применительно к предвестникам землетрясений рассматривалось в работах Т.Л. Челидзе [1987; и др.]. В этих работах для характеристики механизма тензочувствительности электропроводящих систем использована теория перколяции (протекания), которая позволяет оценить степень связности таких систем.

Тензочувствительность флюидных систем на различных стадиях сейсмического процесса детально изучалась автором [Киссин, 1988, 1993; и др.]. Были рассмотрены типичные схемы проявлений высокой тензочувствительности флюидных систем в разных геолого-структурных и гидрогеологических условиях. Установлено, что тензочувствительность флюидных систем подчиняется закономерностям, выведенным в теории перколяции. Если изменения в системе достигают определенного критического уровня — порога перколяции, то система может перейти в новое состояние. Чем ближе система к критическому уровню, тем меньшее возмущение приведет ее в новое состояние.

Чтобы лучше уяснить механизм тензочувствительности флюидных систем, рассмотрим его на примере системы, состоящей из разлома, пересекающего два водоносных горизонта (трещинные зоны). Каждый из этих резервуаров содержит воду со своими показателями давления, температуры, химического и газового состава, которые могут быть существенно различными. Характеристики воды, циркулирующей в разломе, зависят от этих показателей и доли воды, поступающей в разлом из каждого горизонта. Эти доли определяются флюидными давлениями и коллекторскими свойствами указанных горизонтов, а также условиями гидравлической связи между ними, т. е. водопроницаемостью разлома. Если система подвергается деформациям (сжатию или растяжению), поступление воды из каждого горизонта может изменяться в широких пределах, что повлечет за собой соответствующие изменения характеристик воды в разломе.

Для такой обстановки было предложено соотношение, определяющее пьезометрический уровень воды в скважине, вскрывающей разлом [Киссин, 1988]

$$H = \frac{H_1 T_1 + H_2 T_2}{T_1 + T_2}, \quad (2)$$

где H_1 , H_2 и T_1 , T_2 — соответственно пьезометрический уровень (напор) и водопроницаемость каждого горизонта. Аналогичные выражения могут быть получены и для других флюидных показателей. Соотношения величин водопроницаемости T_1 и T_2 под действием деформаций до, во время или после землетрясения могут сильно изменяться. При этом значение уровня (давления) воды H изменится в пределах от H_1 до H_2 . Подобным образом зависят от водопроницаемости показатели температуры, химического и газового составов воды. Понятно, что амплитуда изменений всех этих показателей зависит от степени различия (контрастности) соответствующих характеристик в горизонтах, которые пересекаются разломом.

Аналогичная картина будет иметь место, если рассматриваемые водоносные горизонты или трещинные зоны пересекаются не разломом, а непосредственно глубокой скважиной. Такие случаи неоднократно наблюдались на практике. Как это видно из таблицы, в большинстве скважин, по которым были зарегистрированы высокоамплитудные эффекты, фильтр или открытый ствол имеют значительную протяженность (например, в скв. Нижняя Фирюза-2г открытый ствол занимает интервал от 57 до 1210 м). При этом скважина вскрывает несколько водоносных горизонтов или трещинных зон.

Соотношение (2) выведено еще до поступления натуральных данных, подтверждающих его. Такое подтверждение было получено позже, в результате наблюдений на Казанджикской группе скважин в Туркменистане [Киссин и др., 1990], о чем уже упоминалось выше (см. таблицу). Эти наблюдения проводились по пяти скважинам, расположенным на профиле длиной 2 км в зоне Главного Копетдагского разлома. Только по скв. 1гс, которая пересекает разлом, были зафиксированы предвестники землетрясений, а в других скважинах, расположенных в разных блоках по обе стороны от разлома, реакции на землетрясения не отмечались (см. рис. 4).

На рис. 11 приведены схемы изменений деформаций и гидродинамических условий в зоне Главного Копетдагского разлома. Как показано на рис. 4 и 11, абсолютные отметки уровня воды по скважинам в высоконапорной системе Копетдага 104—107 м, в низконапорной системе передового прогиба — от 0 до 22 м. Разлом разделяет две гидродинамические системы и изолирует одну от другой. Судя по вариациям уровня подземных вод, подготовка обоих землетрясений 26.12.1986 г. и 07.09.1987 г. сопровождалась деформациями растяжения. В результате этих деформаций были нарушены барьерные функции разлома, по которому возникла гидравлическая связь между двумя гидродинамическими системами. Растяжение

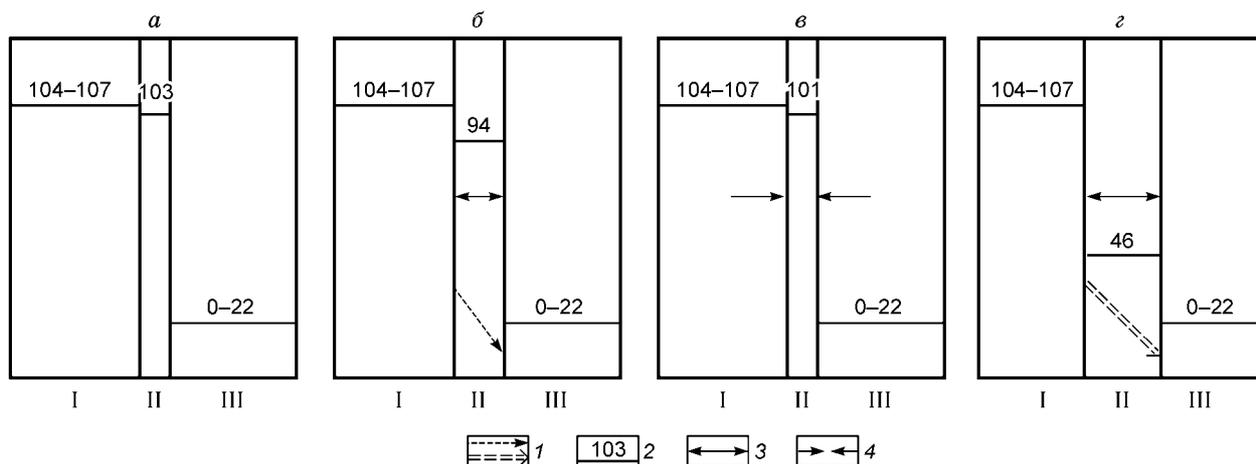


Рис. 11. Схема гидродинамической обстановки в зоне Главного Копетдагского разлома и состояния разлома в 1985—1989 гг. (масштаб не сохранен).

I — Копетдагский блок; II — зона Главного Копетдагского разлома; III — блок Предкопетдагского прогиба и Туранской плиты. 1 — фильтрационные потоки различной интенсивности; 2 — уровень подземных вод, абс. отг., м; 3, 4 — деформации: 3 — растяжения, 4 — сжатия. Периоды: *a* — 1985 г.—август, сентябрь 1986 г., *б* — землетрясение 26.12.1986 г., *в* — начало января 1987 г., *з* — после землетрясения 07.09.1987 г.

перед первым землетрясением вызвало снижение уровня воды на 8.6 м, затем, после возвращения разлома в исходное состояние, на что указывает почти полное восстановление уровня, продолжилось интенсивное снижение уровня, амплитуда которого к моменту второго землетрясения достигла 57 м. Последнее снижение приблизило уровень воды к положению, которое он занимает в низконапорной системе, и оказалось необратимым, что, очевидно, указывает на сохранение в разломе остаточных деформаций растяжения.

Конечно, приведенная схема дает лишь самую общую характеристику деформаций в зоне разлома. Такая трактовка, вытекающая из анализа гидродинамического режима, полностью соответствует сложившимся представлениям о новейшей тектонике зоны Главного Копетдагского разлома, испытывающей тангенциальное сжатие при сближении Туранской и Иранской (Аравийской) плит [Сидоров, Кузьмин, 1989; и др.]. При этом указанные деформации растяжения следует рассматривать относительно длительно развивающегося сжатия зоны разлома. Подобная интерпретация гидрогеодинамических эффектов обоих землетрясений позволила сделать вывод, что деформации в зоне разлома значительно превышали их расчетные величины, которые для землетрясений 26.12.1986 г. и 07.09.1987 г. были соответственно равны 10^{-9} и 10^{-7} [Киссин и др., 1990]. Другой вывод: исключительно высокая амплитуда эффекта-предвестника определяется своеобразными условиями данного района, которые отличаются очень большой тензочувствительностью гидрогеодинамического поля.

Механизмы формирования тензочувствительности флюидных систем могут быть использованы для объяснения природы высокоамплитудных и отдаленных эффектов не только по флюидным показателям, но и по другим полям, прежде всего электрическим и электромагнитным. Ведь изменения этих полей часто зависят от степени связности флюидных токопроводящих каналов и фильтрации по ним флюидов. Тензочувствительность обладает резко выраженными нелинейными свойствами. Она может сильно изменяться во времени [Николаев, 1987]. Коэффициент тензочувствительности зависит от напряженно-деформированного состояния среды. Применительно к изменению уровня Δh или других показателей подземных вод этот коэффициент

$$K(\Delta \varepsilon) = \Delta h / \Delta \varepsilon. \quad (3)$$

При этом изменение деформации $\Delta \varepsilon$ должно быть определено с учетом структуры флюидной системы.

На рис. 12 показаны схемы изменений уровня подземных вод Δh или реакций по другим полям в зависимости от изменений деформации $\Delta \varepsilon$. Такие схемы соответствуют различным условиям тензочувствительности [Киссин, 1993]. При нормальной тензочувствительности (см. рис. 12, *a*) нелинейность этой зависимости может быть небольшой. При аномально высокой тензочувствительности наклон кривой резко возрастает после достижения порога перколяции, когда дальнейшие приращения деформаций, даже очень слабые или нулевые, сопровождаются резким увеличением эффекта (см. рис. 12, *б*). Такой характер имеют рассмотренные выше случаи быстрых или скачкообразных вариаций уровня подземных вод,

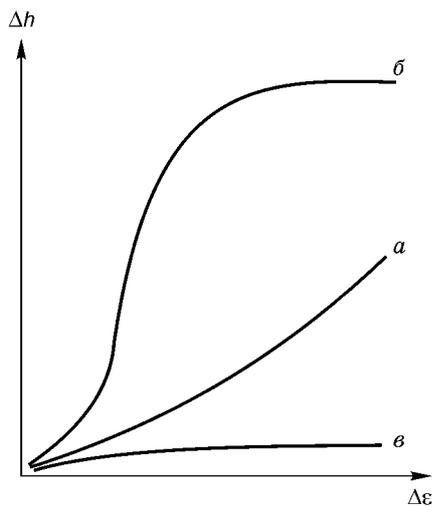


Рис. 12. Схемы реакций уровня подземных вод или иных геофизических показателей (Δh) в зависимости от изменения деформаций ($\Delta \epsilon$).

Тензочувствительность: *a* — нормальная, *б* — аномально высокая, *в* — аномально низкая.

предшествующие или сопутствующие землетрясениям. В случае аномально низкой тензочувствительности та или иная система слабо реагирует на существенные деформации или совсем не дает отклика на них (см. рис. 12, *в*). Такое отсутствие реакции на землетрясения наблюдалось по трем скважинам Казанджикского куста, расположенным вне разлома (см. рис. 4, *б*).

Фактор тензочувствительности пока еще не часто учитывается при интерпретации результатов прогностических наблюдений. Это приводит к грубым ошибкам типа „ложная тревога“ или „пропуск цели“.

В первом случае проявления больших эффектов под действием слабых деформаций (аномально высокая тензочувствительность) истолковываются как предвестники сильного или близкого землетрясения. Во втором случае прогноз таких событий не может быть осуществлен из-за очень слабых эффектов-предвестников или отсутствия таковых в условиях аномально низкой тензочувствительности.

Выше уже упоминалось о влиянии разломов на земноприливные деформации и колебания уровня подземных вод, что связано с повышенной тензочувствительностью различных полей в зонах разломов. Чтобы устранить влияние тензочувствительности при сравнении амплитуд эффектов-предвестников землетрясений для показателей, которые реагируют на земные приливы (наклоны, деформации, уровень подземных вод и др.), было предложено использовать не абсолютные значения амплитуд таких эффектов, а их приведенные значения — приливные коэффициенты предвестника T [Киссин, 1988]

$$T = A/a_{t \max}, \quad (4)$$

где A — амплитуда эффекта-предвестника — уровня воды или другого показателя, $a_{t \max}$ — максимальная амплитуда приливных колебаний этого показателя. Величина $a_{t \max}$ характеризует реакцию наблюдательной системы на известные возмущения, т. е. служит константой данной системы. В прогнозной практике для оценки приливных коэффициентов предвестника эту величину можно определять, не прибегая к сложным расчетам, по ряду наблюдений продолжительностью около месяца, включающему максимальный приливный эффект суммарного воздействия двухнедельных и более коротких приливных волн. Для достижения большей точности вместо указанной величины должна быть использована амплитуда приливной волны, например, волны M_2 . В „чувствительных зонах“ земной коры приливные коэффициенты гидрогеодинамических предвестников существенно выше, чем в большинстве других структур. Например, по наблюдениям за такими предвестниками на одной из скважин в юго-западной части Ферганской долины, $A = 11$ см, $a_{t \max} = 2$ см, $T = 5.5$, а для упомянутой скв. 2г в Прикопетдагской „чувствительной зоне“ $A = 15.6$ м, $a_{t \max} = 13$ см, $T = 120$.

НЕОДНОРОДНОСТЬ СРЕДЫ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Изучение „чувствительных зон“ земной коры и зарегистрированных в таких зонах высокоамплитудных и отдаленных эффектов землетрясений показывает, что наиболее важными особенностями структуры таких зон и развивающихся в них процессов является воздействие факторов неоднородности и нелинейности. Факторы эти также оказывают существенное влияние на характер предвестников, ко- и постсейсмических эффектов, наблюдаемых в сейсмоактивных областях вне „чувствительных зон“. Для более полного понимания природы и особенностей предвестников землетрясений, проявляющихся в различных полях, автором были сформулированы представления о системе очаг—предвестники землетрясения [Киссин, 2000]. Основные черты этой системы: 1) ее составляющие (развивающийся очаг и предвестники) формируются под воздействием различных компонентов поля напряжений—деформаций; 2) обе части системы подвергаются сильному влиянию факторов неоднородности и нелинейности, однако это влияние различным образом отражается на развитии очага и предвестников землетрясения.

Сейсмический разрыв локализуется на участке, где напряжение сдвига достигает величины прочности породы на сдвиг. Доступные наблюдениям предвестники землетрясений образуются под действием упругих и неупругих деформаций в приповерхностной зоне. Структура поля напряжений—деформаций

в области развивающегося очага и на участках, где проявляются предвестники, усложнена за счет неоднородности среды. Литологическая неоднородность, различия упругих свойств отражаются на величинах деформаций. Упругие свойства пород изменяются в широких пределах, например, модуль Юнга для разных пород от 10^9 до $3 \cdot 10^{11}$ Па [Ржевский, Новик, 1978]. Еще большее влияние на деформации оказывает тектоническая неоднородность — блоковое строение геофизической среды. Величина сигнала-предвестника зависит от тензочувствительности того или иного поля и соответствующих наблюдательных систем, что определяет нелинейную зависимость этого сигнала от деформаций. Для рассматриваемых высокоамплитудных и отдаленных эффектов их зависимости от параметров землетрясений чаще всего очень слабые или даже полностью отсутствуют. Таким образом, поле напряжений-деформаций, в котором проявляются предвестники землетрясения, нельзя полностью идентифицировать с соответствующим полем, ответственным за формирование сейсмического разрыва. На основании этого был сделан вывод, что предвестники в принципе не могут дать достаточно адекватную характеристику тех компонентов поля напряжений—деформаций, которые определяют условия сейсмического разрыва [Киссин, 2000].

На различия условий формирования сейсмического разрыва и его приповерхностных предвестников указывают исследования, проведенные А.С. Алексеевым с сотрудниками [Alekseev et al., 2000]. Ими было выполнено моделирование поля напряжений в изотропно-упругом полупространстве. При этом источником напряжений служила единичная сосредоточенная сила. Результаты моделирования позволили установить образование двух зон дилатансии: „очаговой“, в окрестности точки приложения силы, и „пограничной“, в приповерхностном слое. Было показано, что „пограничная зона“, где в натуральных условиях формируются доступные наблюдениям предвестники разрушения, может иметь большую протяженность и сложную конфигурацию. Данные моделирования относятся к сравнительно простой обстановке (изотропная среда, точечный источник). Даже в такой обстановке наличие двух зон дилатансии определяет сложные, нелинейные зависимости между процессом формирования разрыва и его приповерхностными эффектами. Эти зависимости значительно усложняются в неоднородной среде, состоящей из блоков различной иерархии, в которой развивается сейсмический разрыв с индивидуальными особенностями его механизма. Все это определяет слабые корреляционные зависимости между параметрами землетрясения и предваряющими его изменениями в разных геофизических полях.

Известно несколько классификаций предвестников землетрясений по генетическому признаку [Соболев, 1984; Ishibashi, 1988; Киссин, 1988; и др.]. В соответствии с новыми данными можно выделить два основных типа предвестников, регистрируемых по различным полям. К типу I относятся эффекты, связанные с развитием деформаций, предшествующих образованию магистрального разрыва в очаге землетрясения. Этот тип соответствует I классу предвестников, по Г.А. Соболеву [1984]. Формирование предвестников I типа связано с развитием приповерхностной зоны дилатансии, упомянутой выше. Тип II объединяет эффекты, связанные с нарушением устойчивости на контактах блоков различных порядков в процессе перестройки поля напряжений-деформаций при подготовке землетрясений. Высокоамплитудные и отдаленные предвестники принадлежат к этому типу. В каждом из указанных типов можно различать два подтипа: а — с нормальной, б — с высокой тензочувствительностью. Предвестники типа IIb встречаются преимущественно в „чувствительных зонах“ земной коры. Подобная классификация в значительной степени применима и к постсейсмическим эффектам землетрясений. Ранее автором были выделены три типа постсейсмических эффектов [Киссин, 1997]:

I — эффекты, которые появились в результате образования магистрального разрыва и сопутствующих ему деформаций в очаге землетрясения и на прилегающих к нему участках;

II — эффекты, обусловленные деформациями на контактах блоков различных порядков в процессе релаксации или перестройки поля напряжений—деформаций после землетрясения;

III — эффекты, образовавшиеся после прохождения сейсмических волн, вызванных землетрясением, в районах за пределами зоны перестройки поля напряжений— деформаций или на телесеизмических расстояниях.

Причиной постсейсмических эффектов III типа, регистрируемых на очень больших эпицентральных расстояниях, являются упомянутые выше неупругие деформации, вызванные прохождением сейсмических волн. Надо полагать, что в большинстве случаев такие неупругие деформации образуются при взаимодействии сейсмических волн с полем напряжений, существующим в верхних горизонтах земной коры. При этом величина и характер деформации зависят от параметров поля напряжений, а прохождение волн служит спусковым механизмом, вызывающим разрядку напряжений.

В сейсмологии хорошо известно, что сильные землетрясения часто бывают не единичными. После сильного землетрясения в сейсмоактивном регионе на более или менее значительном удалении от его эпицентра нередко происходят повторные события с сопоставимо высокой магнитудой. Наиболее наглядный свежий пример — серия сильнейших землетрясений 2004—2005 гг. в районе о. Суматра. Это значит, что сильное землетрясение влечет за собой перестройку поля напряжений—деформаций системы блоков на обширной территории. Такая перестройка определяется механизмом самоорганизации систем блоков

[Садовский, 1986]. С механизмом самоорганизации связано и состояние „чувствительных зон“ земной коры, расположенных на контактах блоков различных порядков. Состояние этих зон отражает степень подвижности сопредельных блоков относительно друг друга при потере ими устойчивости.

Наблюдения за геофизическими полями в „чувствительных зонах“ должны использоваться не только для поиска предвестников землетрясений, но и для определения вероятности повторных сильных землетрясений или афтершоков. Изменения показателей таких полей до и после землетрясения могут указывать на степень разрядки напряжений после толчка. Это подтверждают данные наблюдений за гидрогеодинамическими эффектами в период Газлийских землетрясений 08.04.1976 г. с $M = 7.0$ и 17.05.1976 г. с $M = 7.3$. Выше уже приводились данные о предвестниках обоих землетрясений (см. таблицу и рис. 3, а). Как показано на этом рисунке, резкие изменения кривой уровня воды были отмечены перед обоими землетрясениями. После толчка 08.04.1976 г. началось новое интенсивное падение уровня, что указывало на продолжение деформационного процесса. Вслед за окончанием бухтообразной вариации уровня произошло землетрясение 17.05.1976 г., после которого наблюдалось повышение уровня воды и его приближение к фоновым значениям. Таким образом, предвестники и постсейсмические эффекты обоих землетрясений, проявившиеся в Прикопетдагской „чувствительной зоне“, полностью соответствовали стадиям развития каждого очага.

Следствием влияния факторов неоднородности и нелинейности на характеристики предвестников землетрясений являются известные особенности предвестников: мозаичность их распределения, недостаточная корреляция с магнитудой землетрясения и эпицентрными расстояниями. Все эти особенности гораздо сильнее проявляются в предвестниках II типа, чем в эффектах, относящихся к I типу. Изучение свойств предвестников по гидрогеодинамическому, а также по другим полям позволило установить, что факторы неоднородности и нелинейности в значительно большей степени влияют на пространственное распределение предвестников и амплитуды сигналов, чем на ход кривой предвестника, который позволяет судить о времени ожидаемого землетрясения [Киссин, 2000]. Таким образом, из трех компонентов сейсмического прогноза (определение места, силы и времени землетрясения) время события может быть предсказано с относительно большей степенью вероятности. Это подтверждается практикой прогностических наблюдений: известны случаи, когда землетрясения происходили в ожидаемые периоды времени, но на довольно больших удалениях от района предполагаемого эпицентра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция геофизической среды М.А. Садовского [1984] продолжает развиваться в работах его последователей. Одним из основных направлений в них являются исследования динамики блочных структур и межблоковых контактов [Костюченко и др., 2002; Кочарян, Спивак, 2003; и др.]. Инструментальные наблюдения при подземных ядерных взрывах и других воздействиях позволили установить важные особенности движения и деформирования блочных структур. Существенным источником наших знаний в этом направлении может служить изучение „чувствительных зон“ земной коры, приуроченных к межблоковым контактам, в которых обнаружена очень сильная реакция различных геофизических полей на возмущения, связанные с сейсмическими процессами. Имеющиеся данные показывают, что эта реакция проявляется в большей степени на контактах наиболее крупных блоков. Примером может служить Прикопетдагская „чувствительная зона“, расположенная на сочленении крупных блоков — Копетдагского мегантиклинория и Туранской плиты. В этой зоне зарегистрированы самые сильные отклики геофизических полей на подготовку и акты землетрясений при больших эпицентральных расстояниях. Данное свойство „чувствительных зон“ (зависимость от иерархии блоков и межблоковых контактов) соответствует выводу, полученному в результате инструментальных наблюдений, об обратной зависимости между жесткостью межблоковых контактов и размерами соответствующих блоков [Костюченко и др., 2002]. Так, нормальная жесткость межблоковых границ уменьшается от 350—450 МПа/мм в блоках длиной 10—20 м до 0.03—0.06 МПа/мм в границах, приуроченных к крупным разломам, которые разделяют блоки размерами 100—200 км.

Новые данные подтверждают, что потеря устойчивости в сочленениях блоков может происходить при слабых внешних воздействиях [Кочарян и др., 2005]. Это возможно и при небольшом энергетическом вкладе, связанном с подготовкой землетрясения, удаленного от данного разлома. Надо полагать, что подготовка сильного землетрясения может сопровождаться относительно небольшими перемещениями довольно крупных блоков. При этом на контактах блоков — в „чувствительных зонах“ — возникают эффекты-предвестники с большой амплитудой, а внутри блоков такие эффекты проявляются слабее. Изложенные представления о „чувствительных зонах“ содержат важную информацию о процессах, развивающихся на контактах между крупными блоками земной коры [Киссин, 2006]

Крупным блокам земной коры присущи индивидуальные особенности геофизических полей, которые в смежных блоках могут существенно различаться. При этом в межблоковых интервалах образуются

большие градиенты показателей каждого поля. Наличие таких градиентов, как было показано на примере зоны Главного Копетдагского разлома, создает условия для очень высокой тензочувствительности.

В последнее время можно констатировать наступление определенного кризиса в проблеме прогноза землетрясений. Ставятся под сомнение возможности такого прогноза на основе наблюдений предвестников сейсмических событий по различным геофизическим полям. Имеющиеся натурные данные о предвестниках часто указывают на их невысокую достоверность. Это связано с двумя основными причинами. Существующие сети наблюдений, как правило, очень редкие, они не позволяют определить сложный характер возмущений того или иного поля в обширной области подготовки землетрясения. Интерпретация предвестников обычно проводится на основе упрощенных представлений об однородной среде и линейных зависимостях наблюдаемых эффектов от силы ожидаемого землетрясения и эпицентральных расстояний. Приведенные выше характеристики „чувствительных зон“ земной коры и связанных с ними высокоамплитудных и отдаленных эффектов со всей очевидностью демонстрируют низкую продуктивность такого подхода.

Нынешние трудности в решении проблемы прогноза землетрясений, на наш взгляд, проистекают от недостаточного понимания особенностей развития сейсмического процесса и условий формирования сопутствующих реакций различных полей в сложно построенной геофизической среде. Нужно полностью согласиться с утверждением, что в процесс подготовки сильного землетрясения вовлекаются обширные области земной коры, и землетрясение происходит в результате активизации этих областей [Гольдин, 2002]. Подобных позиций придерживался автор при выделении упомянутого выше II типа предвестников землетрясений, которые формируются при нарушении устойчивости на контактах блоков в обширной области [Киссин, 1988, 2000]. Строго говоря, предвестники II типа — это не признаки предразрушения перед сейсмическим разрывом, а реакция геофизических полей на перестройку напряженно-деформированного состояния в указанной обширной области земной коры. В результате такой перестройки происходит землетрясение, после которого перестройка может продолжаться. Приведенные данные о „чувствительных зонах“ земной коры и приуроченных к ним высокоамплитудных и отдаленных эффектах являются серьезным подтверждением правомерности выделения предвестников II типа.

Изучение высокоамплитудных эффектов в „чувствительных зонах“ показало, что *не было ни одного случая, когда бы след за проявлением такого эффекта не происходило сильное землетрясение в окружающей более или менее обширной области*. Наиболее интенсивная фаза этих эффектов наблюдалась обычно в течение дней и первых месяцев до землетрясения на эпицентральных расстояниях от 70 до 560 км (см. таблицу). Таким образом, можно полагать, что подобные эффекты служат достаточно надежными кратко- и среднесрочными предвестниками сильных землетрясений.

Диагностика эффектов, которые могут служить предвестниками ожидаемого землетрясения, будет способствовать повышению достоверности сейсмического прогноза. Ранее были предложены некоторые подходы к решению этого вопроса [Киссин, 1988, 2000]: нормирование наблюдаемых сигналов-предвестников по реакции на земноприливные деформации и другие известные возмущения; увеличение плотности наблюдательных сетей в особо важных сейсмоопасных районах; использование дистанционных методов наблюдений за предвестниками в целях контроля обширных территорий. Существенного прогресса в этом направлении можно ожидать в результате вибросейсмического мониторинга сейсмоопасных зон и определения интегрального предвестника землетрясений [Alekseev et al., 2000].

ЛИТЕРАТУРА

Арбузов В.А., Берри И.Л., Казарян С.В. О влиянии землетрясений на режим месторождений углекислых минеральных вод горно-складчатых областей // Вопросы изучения лечебных минеральных вод, грязей и климата. М., 1979, с. 101—110. (Тр. ЦНИИ курортологии и физиотерапии, Т. 39).

Баласанян С.Ю. Высокочувствительные энергоактивные точки Земли (явление ВЭТ): ключ к дальнейшему пониманию физики землетрясений? // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (1), с. 83—99.

Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Николаев А.В. О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду. Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений // Докл. АН СССР, 1987, т. 297, № 1, с. 52—56.

Белоусов В.В., Шолпо В.Н. Сейсмология и геотектоника // Проблемы современной сейсмологии. Голицынские чтения. М., Наука, 1985, с. 47—56.

Боканенко Л.И., Галаганов О.Н., Передерин В.П. Вариации уровня подземных вод Гармского полигона (Таджикистан) и возможности прогнозирования землетрясений // Физика Земли, 1999, № 5, с. 72—82.

Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика, 2002, № 5, с. 5—22.

Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М., ИФЗ АН СССР, 1984, 188 с.

Киссин И.Г. „Чувствительные зоны“ земной коры и амплитуды аномалий—предвестников землетрясений // Докл. АН СССР, 1985, т. 281, № 2, с. 304—307.

Киссин И.Г. Высокоамплитудные предвестники землетрясений и „чувствительные зоны“ земной коры // Физика Земли, 1988, № 6, с. 3—13.

Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли, 1993, № 8, с. 58—69.

Киссин И.Г. О соотношениях между предвестниками землетрясений и постсейсмическими эффектами // Докл. РАН, 1997, т. 354, № 6, с. 804—807.

Киссин И.Г. Система очаг—предвестники землетрясений и влияние на нее факторов неоднородности и нелинейности // Физика Земли, 2000, № 4, с. 69—75.

Киссин И.Г. „Чувствительные зоны“ земной коры как проявления динамики межблоковых взаимодействий // Докл. РАН, 2006, т. 407, № 3, с. 394—399.

Киссин И.Г., Беликов В.М., Ишанкулиев Г.А. Экстремальные вариации уровня подземных вод в сейсмоактивном районе // Докл. АН СССР, 1990, т. 314, № 5, с. 1099—1103.

Киссин И.Г., Беликов В.М., Ишанкулиев Г.А. О влиянии регионального разлома на гидрогеологические эффекты геодинамических процессов // Докл. РАН, 1992, т. 324, № 2, с. 297—302.

Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К. Процессы подготовки сильных ($M > 6.6$) землетрясений Камчатки 1987—1993 гг. по данным многолетних комплексных наблюдений // Вулканология и сейсмология, 2004, № 4, с. 55—61.

Костюченко В.М., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физическая мезомеханика, 2002, № 5, с. 23—42.

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

Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков В.К., Марков Д.В., Павлов Д.В. Малые возмущения и напряженно-деформированное состояние земной коры // Физическая мезомеханика, 2005, № 1, с. 23—36.

Латынина Л.А., Шишкина Т.П. Об интенсивности приливных и тектонических движений в зоне Сурхобского разлома // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1978, № 6, с. 87—93.

Мавлянов Г.А., Султанходжаев А.Н., Азизов Г.Ю., Машрапов З.М., Лунева Н.А., Зиявутдинов Р.С. Аномальные вариации гидрогеохимических параметров подземных вод Восточной Ферганы — предвестник Алайского землетрясения 2.XI.1978 г. // Узб. геол. журн., 1981, № 2, с. 9—13.

Мельхиор П. Земные приливы. М., Мир, 1968, 484 с.

Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмологии // Проблемы нелинейной сейсмологии. М., Наука, 1987, с. 5—19.

Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М., Недра, 1978, 392 с.

Садовский М.А. О моделях геофизической среды и сейсмического процесса // Прогноз землетрясений, 1984, № 4, с. 268—272.

Садовский М.А. Автомодельность геодинамических процессов // Вестн. АН СССР, 1986, № 8, с. 3—11.

Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М., Наука, 1989, 183 с.

Соболев Г.А. Предвестники сейсмических явлений // Прогноз землетрясений, 1984, № 4, с. 120—137.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 314 с.

Современные движения и деформации земной коры на геодинамических полигонах. М., Наука, 1983, 170 с.

Султанходжаев А.Н., Азизов Г.Ю., Латипов С.У., Зиган Ф.Г., Арифбаев А.Х. Гидрогеосейсмологические предвестники Джиргатальского землетрясения по результатам исследований на Ферганском прогностическом полигоне // Узб. геол. журн., 1986, № 3, с. 7—12.

Челидзе Т.Л. Методы теории протекания в механике геоматериалов. М., Наука, 1987, 136 с.

Alekseev A.S., Belonov A.S., Petrenko V.E. On the multidisciplinary approach to determination of an integral earthquake precursor // J. Earthquake Prediction Res., 2000, v. 8, № 3, p. 256—274.

Ishibashi K. Two categories of earthquake precursors, physical and tectonic, and their roles in intermediate-term earthquake prediction // Pageoph., 1988, v. 126, № 2/4, p. 687—700.

King C.-Y., Azuma S., Igarashi G., Ohno M., Saito H., Wakita H. Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan // J. Geophys. Res., 1999, v. 104, № B6, p. 13073—13082.

Kissin I.G., Grinevsky A.O. Main features of hydrogeodynamic earthquake precursors // Tectonophysics, 1990, v. 178, p. 277—286.

Kissin I.G., Belikov W.M., Ishankuliyev G.A., Wang Chengmin, Zhang Wei, Dong Shouyu, Jia Huazhou, Wan Dikun. High amplitude hydrogeologic precursors of earthquakes in seismic regions of the former Soviet Union and China: a comparative analysis // *J. Earthquake Prediction Res.*, 1993, v. 2, № 1, p. 89—104.

Kissin I.G., Belikov V.M., Ishankuliev G.A. Short-term groundwater level variations in a seismic region as an indicator of the geodynamic regime // *Tectonophysics*, 1996, v. 265, p. 313—326.

Mei Shirong. On the variety and complexity of the short-term and urgent precursors of the Tangshan earthquake // XIX General Assembly European Seismological Commission. Moscow, 1984, p. 21.

Roeloffs E. Hydrologic precursors to earthquakes: a review // *Pure Appl. Geophys.*, 1988, v. 126, № 2—4, p. 177—209.

Roeloffs E. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes // *J. Geophys. Res.*, 1998, v. 103, № B1, p. 869—889.

Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. Modelling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // *Geophys. J. Int.*, 2004, v. 157, p. 717—726.

*Рекомендована к печати 3 февраля 2006 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию 30 июня 2005 г.,
после доработки — 30 декабря 2005 г.*