

ISSN 0034-026X



РАЗВЕДКА ШЕДР И ОХРАНА ПЕДР

ОСНОВАНО 1957



7 — 2008

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

© Копылова Г.Н., 2008

Копылова Г.Н. (Камчатский филиал Геофизической службы РАН)

О СВЯЗИ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ И ДЕФОРМАЦИЯМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА СТАДИЯХ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В работе проводится сопоставление пространственно-временного распределения гидрогеологических предвестников зон сейсмического затишья и активизации в пределах Камчатской сейсмоактивной зоны, горизонтальных деформаций земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений 1987–1997 гг. и их групп. Показано, что гидрогеологические

предвестники формируются на заключительной стадии развития области сейсмического затишья во время слабой сейсмической активизации; им предшествует горизонтальное сжатие континентальных районов по геодезическим данным. Обсуждается модель процессов подготовки сильных землетрясений, основанная на результатах многолетних сейсмологических, геодезических и гидрогеологических наблюдений.

Развитие теоретических представлений о процессах подготовки сильных землетрясений основывается на обобщении результатов регистрации предвестников, полученных сейсмологическими и геодезическими методами, и их дополнения данными других методов наблюдений, в частности, данными гидрогеологического метода, базирующегося на высокой чувствительности подземной

гидросферы к изменениям напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород.

С 1977 г. по настоящее время Камчатским филиалом Геофизической службы РАН проводятся исследования по поиску гидрогеологических предвестников землетрясений на сети станций Петропавловского полигона, включающих скважины и источники. По результатам измерений уровня воды в пьезометрических скважинах и регистрации дебита, температуры воды, концентраций компонентов химического состава воды и газа подземных вод в самоизливающихся скважинах и источниках установлены основные закономерности проявления гидрогеологических предвестников камчатских землетрясений [4, 5, 7, 12].

1. Аномальные изменения параметров химического и газового состава подземных вод в самоизливающихся скважинах и источниках (гидрогеохимические предвестники) наблюдаются преимущественно перед сильными ($M=6,6-7,8$) землетрясениями на гипоцентральных расстояниях $R \leq 90-320$ км. Такие землетрясения характеризуются интенсивностью сейсмического воздействия $M/\lg R \geq 3,1-3,5$ и величинами балльности не менее 4–5 баллов по шкале MSK-64 в пунктах наблюдений. Заблаговременность развития таких аномалий до землетрясений составляет десятки суток — месяцы.

2. Формирование гидрогеохимических предвестников на стадиях подготовки землетрясений обусловлено изменением условий гидродинамического взаимодействия подземных вод с различным химическим составом в водоносных системах, питающих самоизливающихся скважины и источники. Источниками флюидов с контрастным химическим составом и физическими свойствами являются поровые воды водовмещающих сред с двойной пористостью при увеличении проницаемости низкопористых блоков и улучшения их гидравлической связи с высокопористыми блоками, либо гидравлически связанные зоны, содержащие подземные воды с различной минерализацией. Гидрогеохимические предвестники в изменениях газохимического состава воды источников и самоизливающихся скважин могут формироваться исключительно при изменении количественного соотношения между смешивающимися водами в водоносных системах или в стволе скважины (выводящем канале источника). Такие явления могут эффективно развиваться при изменении проницаемости водовмещающих пород вследствие неравномерного развития трещинной дилатансии в объеме водоносных систем, содержащих в составе порового флюида газовую фазу [6].

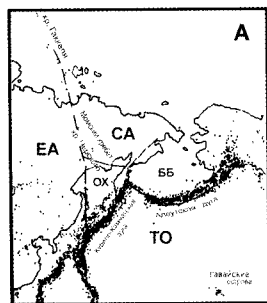
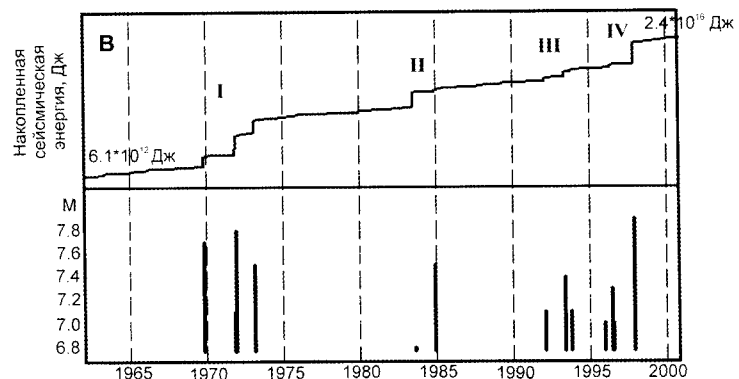
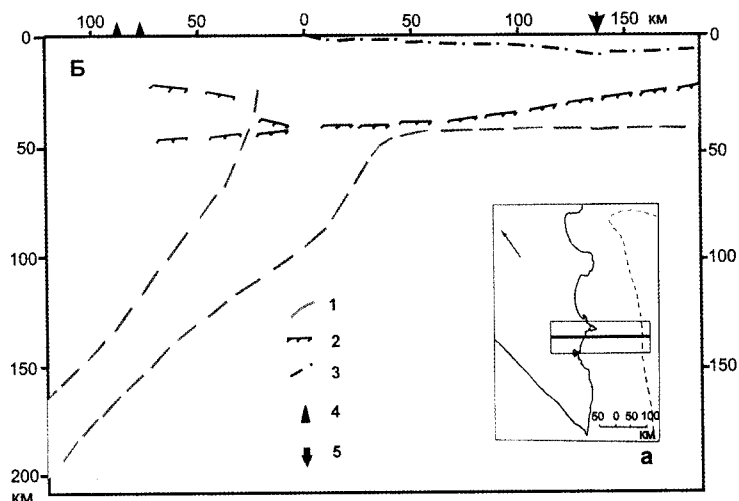


Рис. 1. Характеристика сейсмических условий Камчатки: А – схема расположения сейсмических поясов, сходящихся в районе Камчатки [11] и границы литосферных плит (выделены красным цветом) [3]; ТО – Тихоокеанская плита, СА – Северо-Американская плита, EA – Евразийская плита, BB – Беринговоморский блок, ОХ – Охотоморская микроплита; Б – разрез сейсмофокальной зоны для участка, показанного на врезке [11]; 1 – контур сейсмофокальной зоны; 2 – граница Мохоровичича; 3 – морское дно; 4 – вулканы; 5 – положение оси желоба; В – кумулятивный график выделения сейсмической энергии в 1962–2000 гг. и моменты землетрясений с $M \geq 6,8$ (таблица); I–IV – периоды сейсмической активизации



3. В изменениях уровня воды в скважине Е1 гидрогеодинамический предвестник в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью в течение суток — первых месяцев закономерно проявляется перед землетрясениями с $M \geq 6-7$ на гипоцентральных расстояниях до 320 км [4].

4. Наиболее яркие аномалии химического состава самоизливающихся скважин и синхронные вариации уровня воды в двух пьезометрических скважинах наблюдались перед сильнейшим Кроноцким землетрясением с $M=7,8$, $R=320$ км [5, 12].

В настоящей работе представлена схематическая модель связи выявленных аномалий в режиме подземных вод с изменениями сейсмичности и деформациями земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений с учетом сеймотектонических условий Камчатского региона. В основу работы положены опубликованные материалы сейсмологических, геодезических и гидрогеологических наблюдений, полученные В.Ф. Бахтияровым, Е.И. Гордеевым, А.А. Гусевым, В.М. Зобиным, Г.Н. Копыловой, Н.М. Кравченко, В.Е. Левиным, В.И. Левиной, М.А. Магуськиным, Г.В. Рябининым, В.А. Салтыковым, Г.А. Соболевым, С.А. Федотовым, Ю.М. Хаткевичем, В.Н. Чебровым и др. Выполненное обобщение результатов инструментальных данных сейсмологических, геодезических и гидрогеологических наблюдений 1980–1990-х годов, которые проводились в целях поиска предвестников землетрясений, направлено на создание региональной модели процессов подготовки землетрясений и является полезным для развития средне-краткосрочных методов их прогноза.

Характеристика сейсмотектонических условий Камчатки и вариации сейсмического режима в 1962–2000 гг. П-ов Камчатка находится на стыке литосферных континентальных мегаплит Евразийской, Северо-Американской и Тихоокеанской океанической плиты. В качестве плит меньшего порядка в районе выделяются Охотоморская плита континентального типа и Берингоморский блок [3] (рис. 1А). Границы плит трассируются сейсмическими поясами. Наиболее интенсивная сейсмичность приурочена к контакту Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит.

Определяющим фактором тектонического развития Камчатского региона является высокая скорость движения Тихоокеанской плиты, составляющая 9 см/год. Движение Тихоокеанской плиты создает источник фронтальных напряжений сжатия северо-западного направления в зоне контакта Тихоокеанской и Охотоморской плит. Особенности геодинамики и тектономагматических процессов в этой зоне в позднелицен-четвертичное время связываются с развитием глубокой наклонной сейсмофокальной зоны, в пределах которой сосредоточены более 90% камчатских землетрясений, в т.ч. сильнейшие с магнитудами до 8,5–9 (рис. 1Б). В южной части п-ова Камчатка эта зона рассматривается как область относительного смещения надвигающегося континентального островодужного блока и поддвигающегося океанического блока [11].

В коре п-ова Камчатка землетрясения происходят значительно реже. Их распределение имеет слабо организованную структуру. Они приурочены к крупным разломным зонам, трассирующим границы литосферных плит и обрамляющим Восточный и Срединный хребты, либо связаны с вулкано-тектоническими процессами в пределах вулканических поясов. Глубины коровых землетрясений не превышают 20–25 км, а наибольшие величины магнитуд составляли 5,5–7,0.

В настоящей работе используется формальная классификация землетрясений по энергии: сильнейшими называются землетрясения с магнитудами $M \geq 7,6$; сильными — землетрясения с $M \approx 6,8–7,5$; средними — землетрясения с $M \approx 5,6–6,7$ и фоновыми называются землетрясения с $M \leq 5,5$.

Таблица

Характеристика сильных ($M \geq 6,8$) землетрясений Камчатки 1962–2000 гг.

№ п/п	Дата: год, месяц, день	Координаты эпицентра		Глубина Н, км	K_s	Магнитуды	
		с.ш., град.	в.д., град.			$M_s^{об}$	M_w
1	1969.11.22	57,70	163,50	25	15,3	7,7	7,7
2	1971.11.24	52,77	159,66	100	15,9	7,3	7,5
3*	1971.12.15	55,85	163,35	25	15,4	7,8	7,8
4	1973.02.28	50,40	156,70	70	15,5	7,5	7,4
5*	1983.08.17	55,64	161,52	98	15,4	6,9	7,1
6*	1984.12.28	56,18	163,44	19	14,0	7,5	6,7
7*	1992.03.02	52,76	160,20	20	14,6	7,1	6,8
8	1993.06.08	51,20	157,80	40	14,9	7,4	7,5
9	1993.11.13	51,79	158,83	40	14,6	7,1	7,0
10*	1996.01.01	53,90	159,43	0	14,3	7,0	6,5
11	1996.06.21	51,27	159,63	1	13,9	7,3	6,7
12	1996.07.16	56,00	165,05	40	13,4	7,0	6,5
13*	1997.12.05	54,64	162,55	10	15,5	7,9	7,8
14	1999.03.08	51,75	159,87	15	14,2	7,1	6,9

Примечание: звездочкой помечены землетрясения, в связи с которыми инструментально зафиксированы современные деформации земной коры.

За период детальных сейсмологических наблюдений с 1962 по 2000 г. в пределах Камчатской сейсмоактивной зоны ($50–58^\circ$ с.ш., $156–165^\circ$ в.д.) на глубинах 0–100 км произошло 14 землетрясений с $M \geq 6,8$ (таблица). Положение эпицентров землетрясений приводится на рис. 2. Большая часть их них (1–4, 6–9, 11–14, таблица) относится к межплитовым землетрясениям. Событие 5 представляет внутриплитовое землетрясение, связанное с разрушением континентальной плиты. Событие 10 представляет тектоническое землетрясение в вулканическом районе, произошедшее одновременно с эксплозивным извержением Карымского вулкана и подводным извержением в кальдере Академии Наук.

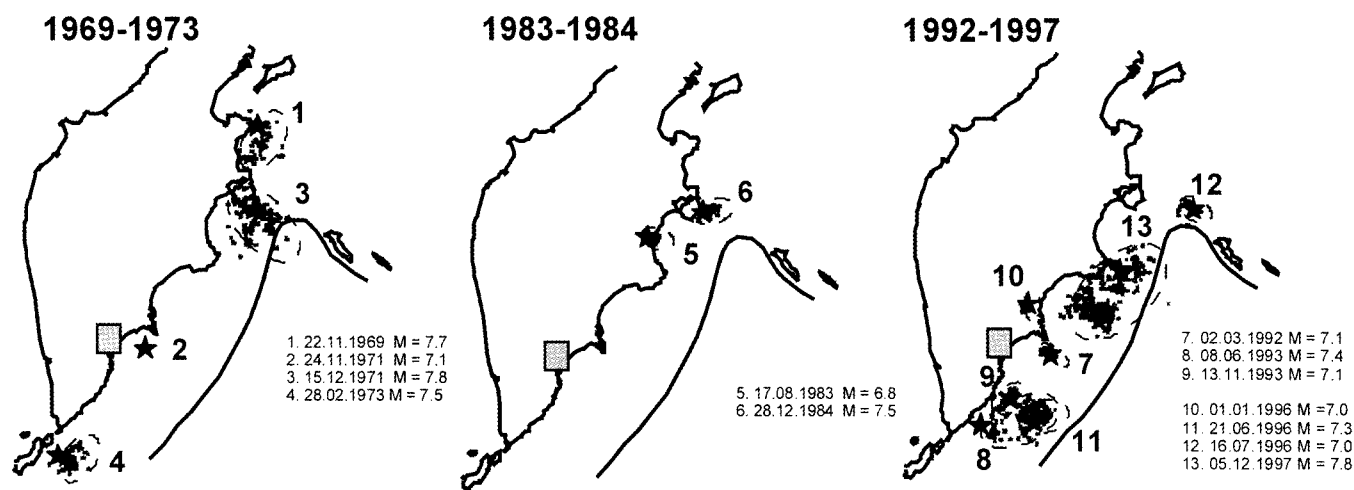


Рис. 2. Схемы расположения очагов сильных камчатских землетрясений во время сейсмических активизаций: 1969–1973 гг., 1983–1984 гг., 1992–1997 гг. Звездочками показаны эпицентры землетрясений; эллипсами — очаги землетрясений по афтершокам первых суток. Номера землетрясений соответствуют номерам в таблице. Серым квадратом показана территория Петропавловского полигона, на которой расположены пункты гидрогеологических наблюдений и линии светодальномерных измерений

Сильнейшие и сильные землетрясения происходили в течение трех непродолжительных интервалов времени: 1 — 1969—1973 гг.; 2 — 1983—1984 гг. и 3 — 1992 — 1999 гг. В течение третьего интервала выделяются два периода активизации, разделенные двухлетним покоем. На рис. 1В представлен кумулятивный график выделения сейсмической энергии в пределах Камчатской сейсмоактивной зоны в сопоставлении с моментами сильных и сильнейших землетрясений. Группы таких землетрясений в количестве от двух до четырех событий соответствуют ступенькам кумулятивного графика, которые обусловлены увеличением сейсмического энерговыделения в результате землетрясений с $M \geq 6,8$. Отсюда следует, что в сейсмическом режиме Камчатки в 1962—2000 гг. можно выделить четыре периода сейсмической активизации (I-IV). Если оценивать продолжительность таких активизаций по времени от момента возникновения первого до момента последнего землетрясения в группе, то средняя продолжительность активизаций составляет 2,1 года, а их суммарная продолжительность — 8,4 года, или 21,5% от общего времени наблюдений (1962—2000 гг., 39 лет). Средняя продолжительность времени фонового сейсмического режима для Камчатки по данным о четырех периодах относительного сейсмического покоя составляет 7,2 года при разбросе величин от 10,4 до 2,1 лет. Суммарная продолжительность фонового сейсмического режима составляет 30,5 лет или 78,5% от общего времени детальных наблюдений.

Приведенные данные по распределению сильных землетрясений 1962—2000 гг. указывают на неслучайный характер их группирования во времени. При средней повторяемости землетрясений с $M \geq 6,8$ 0,36 событий/год (14/39) или ~1 событие в три года, на интервале времени 2,1 года, равного среднему интервалу времени сейсмической активизации, ожидается в среднем менее одного сильного землетрясения (0,75). Фактически на каждом из четырех выделенных интервалов I-IV происходило 2—4 землетрясения.

Это говорит о неравномерности развития сейсмичности во времени в пределах Камчатской сейсмоактивной зоны, когда периоды фонового режима сменяются относительно короткими периодами сейсмических активизаций, включающих группы сильных и сильнейших землетрясений. Такие активизации фиксируют периоды повышенного выделения сейсмической энергии и заключительные стадии предшествующих им геодинамических процессов в среде Камчатской сейсмоактивной зоны. По данным инструментальных наблюдений процессы подготовки сейсмических активизаций и отдельных сильных землетрясений могут проявляться в вариациях режима слабой сейсмичности, в деформациях земной коры и в аномальных изменениях геофизических и геохимических полей, в т.ч. в изменениях параметров режима подземных вод.

В работах [8, 10] выполнено исследование вариаций слабой сейсмичности в очаговых зонах сильных камчатских землетрясений на основе построения пространственно-временного распределения прогностического параметра RTL, позволяющего проследить смену режимов сейсмического затишья и сейсмической активизации. По оценкам автора [10], заблаговременность проявления аномального затишья перед сильными землетрясениями составляет до трех лет. Продолжительность стадии «форшоковой» активизации, сменяющей стадию затишья, составляет от 1 мес до 1,5 лет. Область проявления эффекта составляет ~100 км. Аномалии сейсмического затишья и последующей активизации более четко прослеживаются на глубинах 30—100 км. Сильные землетрясения происходят преимущественно в краевой части аномальной области. Распределение аномалий параметра RTL по площади приводится в работах [8, 10].

В [10] для выделения форшоковой активизации в очагах землетрясений 7, 9 и 13 (таблица) использовались параметр аномалий накопленных площадей сейсмогенных разрывов ΔS и выделение землетрясений-кластеров. Анализ пространственно-временного распределения сейсмических затиший по параметру RTL и всплесков активности по параметру ΔS и по землетрясениям-кластерам показывает (рис. 3), что выделенным группам сильных землетрясений III и IV предшествовали закономерные из-

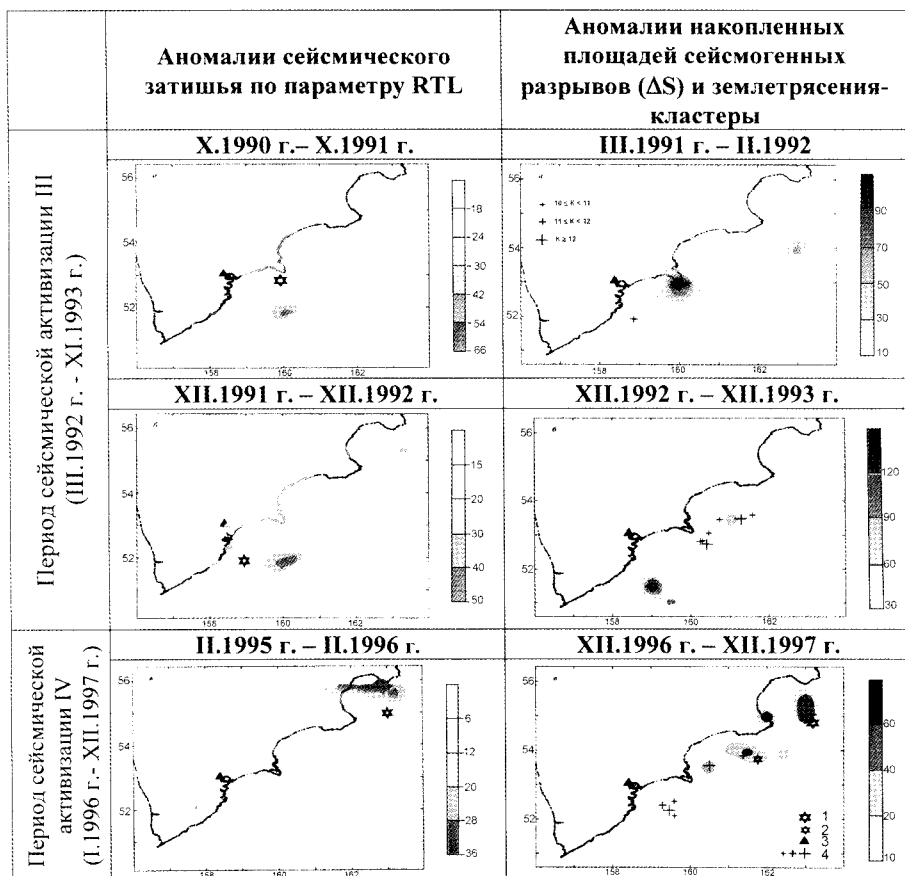


Рис. 3. Развитие во времени и по площади аномалий сейсмического затишья по параметру RTL и аномалий сейсмической активизации по параметру ΔS и по землетрясениям-кластерам [10] на стадиях подготовки групп сильных землетрясений III и IV: 1 — эпицентры сильных землетрясений, 2 — эпицентр сильнейшего афтершока Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M=6,8$; 3 — г. Петропавловск-Камчатский; 4 — землетрясения-кластеры

менения в режиме слабой сейсмичности на обширных участках Камчатской сейсмоактивной зоны. Перед возникновением групп III и IV происходила последовательная смена режимов обширного сейсмического затишья и слабой локальной активизации, тяготеющей к районам будущего возникновения сильных землетрясений.

Такие особенности в режиме слабой сейсмичности на стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений рассматриваются в работе [2] как проявление аккомодационных процессов в напряженной геологической среде, находящейся в состоянии предразрушения. Сейсмические затишья маркируют области диссипации тектонической энергии через квазипластическое течение горных пород. Сейсмическая активизация (форшоки, землетрясения-кластеры) указывает на диссипацию тектонической энергии по механизму хрупкого разрушения. Сильные коровые и верхнемантийные землетрясения обычно происходят на границах областей сейсмического затишья в зонах с контрастными механическими свойствами среды. Местоположение эпицентров сильных землетрясений в отдельных случаях может совпадать с областями слабой активизации сейсмичности в форме аномалий накопленных площадей сейсмогенных разрывов, землетрясений-кластеров и форшоков.

Деформации земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений; их связь с вариациями параметров режима подземных вод. С начала 1970-х годов на Камчатке проводятся инструментальные измерения современных движений земной коры, которые позволили получить количественные и качественные оценки величин, скорости, характера и интервалов времени аномальных деформаций в связи с вариациями сейсмического режима и отдельными землетрясениями [9]. В континентальных районах направления азимутов главных осей деформаций составляют 45° (СВ) и 315° (СЗ), что согласуется с общим характером напряженного состояния среды в сейсмофокальной зоне. По данным круглогодичных светодальномерных измерений горизонтальных деформаций из обсерватории Мишенная обнаружены тренды сжатия по всем линиям со скоростью $-0,03 \text{ — } -0,16 \cdot 10^{-6}$ в год при точности измерений $1\text{—}2 \cdot 10^{-7}$ (рис. 4А). На фоне трендов сжатия выделены бухтообразные укорачивания линий, предшествующие сейсмическим событиям с $M \geq 6,6$, в частности, землетрясениям 17.08.1983 г. (5 в таблице), 6.10.1987 г., $M=6,6$, $R=120$ км; 2.03.1992 г.

(7) и 5.12.1997 г. (13). Продолжительность бухт сжатия, по оценкам авторов [9], составляет от нескольких месяцев до первых лет. Перед землетрясением 17.08.1983 г. плавное укорачивание линий проявлялось в течение 1981—1982 гг. Перед землетрясением 6.10.1987 г. сжатие фиксировалось в течение года, а перед землетрясением 2.03.1992 г. — не менее 9 мес. Перед землетрясением 5.12.1997 г. бухты

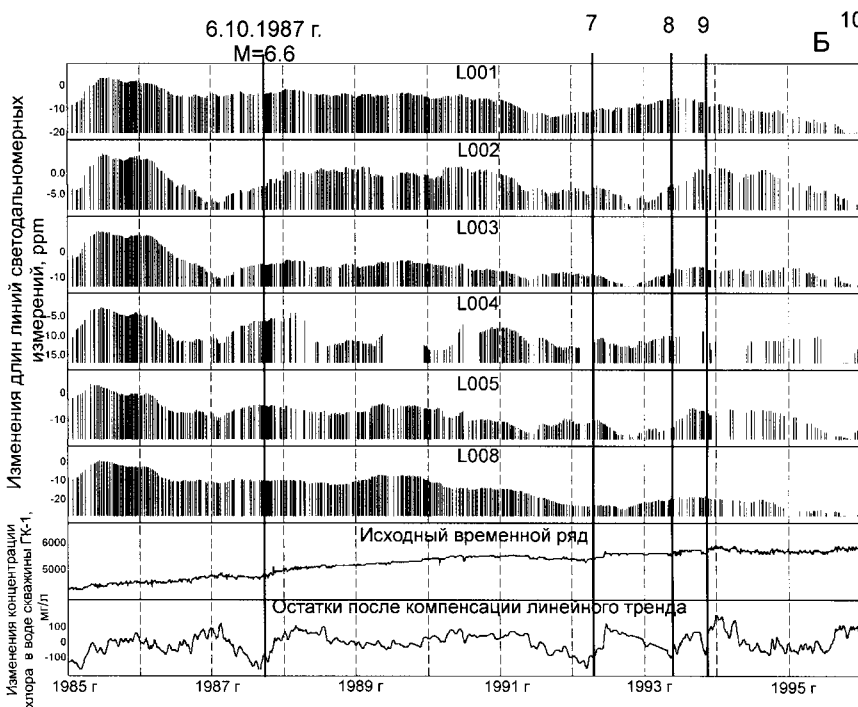
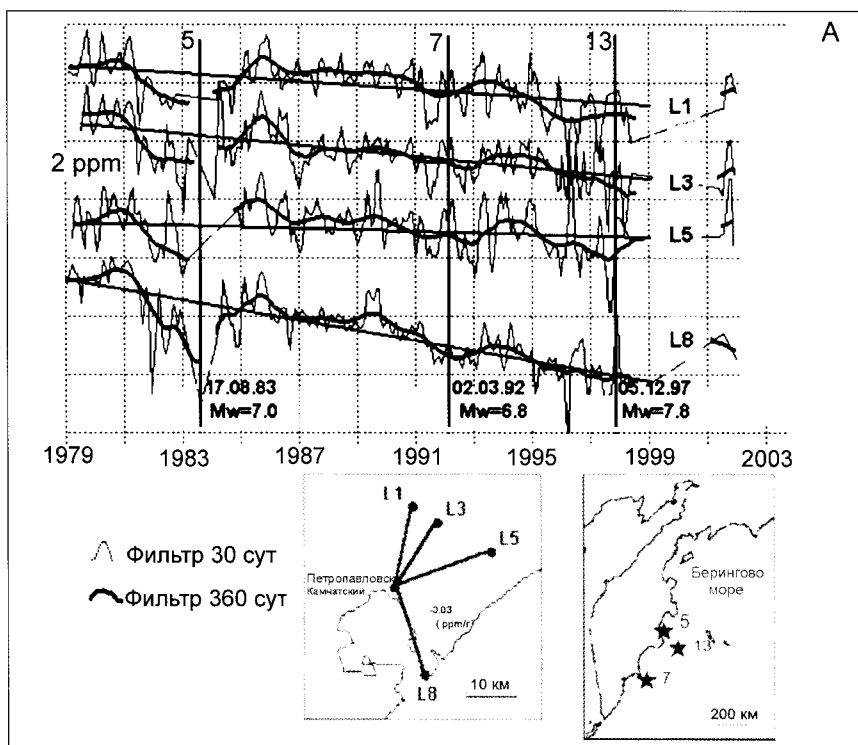


Рис. 4. Изменения длин линий светодальномерных измерений в 1979–2001 гг. [9] (А) и сопоставление вариаций концентрации хлора в воде скважины ГК-1 с изменениями длин линий светодальномерных измерений в 1985–1995 гг. (Б). Вертикальные линии — сильные землетрясения (номера соответствуют номерам землетрясений на рис. 2 и в таблице)

сжатия по отдельным линиям проявлялись в течение примерно двух лет. Амплитуды сжатия составляли первые единицы 10^{-6} . Менее выраженные по амплитуде и по продолжительности бухты сжатия фиксировались перед землетрясениями 8.06.1993 г. (8) и 13.11.1993 г. (9).

Упругое горизонтальное сжатие континентальных районов на стадиях подготовки сейсмических активизаций II-IV с последующим растяжением в период активизации может быть связано с ускорением асейсмического движения океанического блока в направлении СЗ перед землетрясениями и изменением характера его движения на противоположное после землетрясений.

По данным многолетних гидрогеологических наблюдений установлено, что проявление гидрогеохимического предвестника перед сильными землетрясениями наиболее надежно регистрируется в плавных понижениях концентрации хлор-иона в воде скважины ГК-1 в течение месяцев [7, 12]. На рис. 4Б приводится сопоставление изменений длин линий светодальномерных измерений с вариациями концентрации хлор-иона в воде скважины ГК-1 за период 1985–1995 гг. Понижения концентрации хлора ярко выражены перед землетрясениями 6.10.1987 г., 2.03.1992 г. и 1.01.1996, которым также предшествовало относительное укорачивание измерительных линий светодальномерных измерений. Слабее проявилось понижение концентрации хлора и укорачивание линий светодальномерных наблюдений перед землетрясениями 8.06.1993 г. и 13.11.1993 г.

Связь выявленных вариаций химического состава подземных вод с эпизодами горизонтального сжатия территории Петропавловского полигона объясняется развитием специфического процесса объемного деформирования водовмещающих пород в пределах водоносных систем, питающих скважину. Можно предположить, что на стадиях подготовки землетрясений образуются дополнительные концентраторы напряжений в пределах сейсмофокальной зоны вследствие затруднения в перемещении океанического и континентального литосферных блоков. Формирование таких концентраторов приводит к росту напряжений в среде сейсмофокальной зоны и сопровождается горизонтальным сжатием верхних горизонтов коры континентальных районов. В области границы кора-атмосфера может происходить трансформация избыточных напряжений и развитие «пограничного» слоя трещинной дилатансии [1] в водовмещающих породах и изменение их проницаемости. Понижение концентрации хлора в воде отражает, в первую очередь, процесс разбавления подземных вод, содержащихся в питающей водоносной системе, менее минерализованными (пресными) водами, распространенными в приповерхностных грунтовых водоносных горизонтах. Отсюда следует, что дилатансия в водовмещающих породах на стадиях подготовки землетрясений развивается преимущественно в самых верхних зонах водоносной системы, питающей скважину ГК-1. При развитии дилатансии в более глубоких горизонтах земной коры следует ожидать избыточное поступление в питающую водоносную систему высокоминерализованной воды и увеличение минерализации изливающейся воды. Такое явление наблюдалось в течение трех месяцев перед Кроноцким землетрясением, когда длительное понижение концентрации хлора в воде скважины ГК-1 сменилось на его заметное увеличение [12]. В этом случае можно предполагать, что развитие трещинной дилатансии в водовме-

щающих породах распространялось во времени от верхних горизонтов к более нижним, содержащим подземные воды с повышенной минерализацией.

Со второй половины 1996 г. на Камчатке действует сеть GPS станций (KAMNET) в составе девяти пунктов постоянных измерений [9]. По результатам регистрации перемещений GPS-станций определены среднегодовые скорости смещения земной поверхности в пунктах наблюдений, которые составляют от первых мм/год до первых десятков мм/год. Наблюдаемые смещения соответствуют модели субдукции Тихоокеанской плиты под Камчатку.

В связи с Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г. с $M_w=7,8$ (13 в таблице) по данным GPS-наблюдений зарегистрированы пред-, ко- и постсейсмические деформации на расстояниях до сотен км от эпицентра [9]. В течение трех суток до землетрясения в эпицентральной зоне развивался рой землетрясений с максимальными магнитудами $M=5-4$.

На рис. 5 приводится сопоставление перемещений GPS-станций и изменения уровня воды в скв. Е1 и ЮЗ-5 в течение 2,5 мес до Кроноцкого землетрясения. Предсейсмические деформации, особенно ярко проявившиеся в перемещениях ближайших к эпицентру станций KLU, ES1 и KBG, возникли за 1–0,5 мес до землетрясения и отражали предшествующие этому землетрясению преимущественно асейсмические движения в области очага.

За три недели до землетрясения во время развития предсейсмических движений в изменениях уровня воды в двух скважинах, удаленных на 320 км от эпицентра, зарегистрировано синхронное понижение уровня воды (рис. 5), которое выделено в гидрогеодинамический предвестник этого события [5]. В этом случае вариации уровня воды объясняются преимущественно упругой деформацией водовмещающих пород вследствие развития интенсивных предсейсмических движений в области очага.

Следует отметить, что в режиме самоизливающихся скважин гидрогеохимические аномалии (гидрогеохимические предвестники) проявлялись в течение нескольких месяцев перед Кроноцким землетрясением [12]. Это указывает на предшествующее этому землетрясению существенное изменение условий смешивания контрастных по минерализации флюидов в питающих водоносных системах. Как указывалось выше, проявление гидрогеохимических предвестников могло быть связано с длительной (месяцы) эволюцией приповерхностной зоны трещинной дилатансии в водовмещающих породах в процессе подготовки Кроноцкого землетрясения.

Модель процессов подготовки сильных землетрясений Камчатки. Сопоставление вариаций сейсмических, деформационных и гидрогеологических процессов на стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений позволяет выделить два типа их взаимосвязи.

Тип I соответствует формированию гидрогеохимических и гидрогеодинамических аномалий в режиме подземных вод на заключительной стадии развития сейсмического затишья на прилегающем участке сейсмофокальной зоны, сопровождающегося сжатием территории Петропавловского полигона. Образование устойчивых пространственных областей сейсмического затишья в пределах сейсмофокальной зоны и последующей слабой активизации на стадиях подготовки сильных землетрясений рассматривается (в соответствии с моделью С.В. Гольдина [2]) как проявление аккомодационной реакции неоднородной

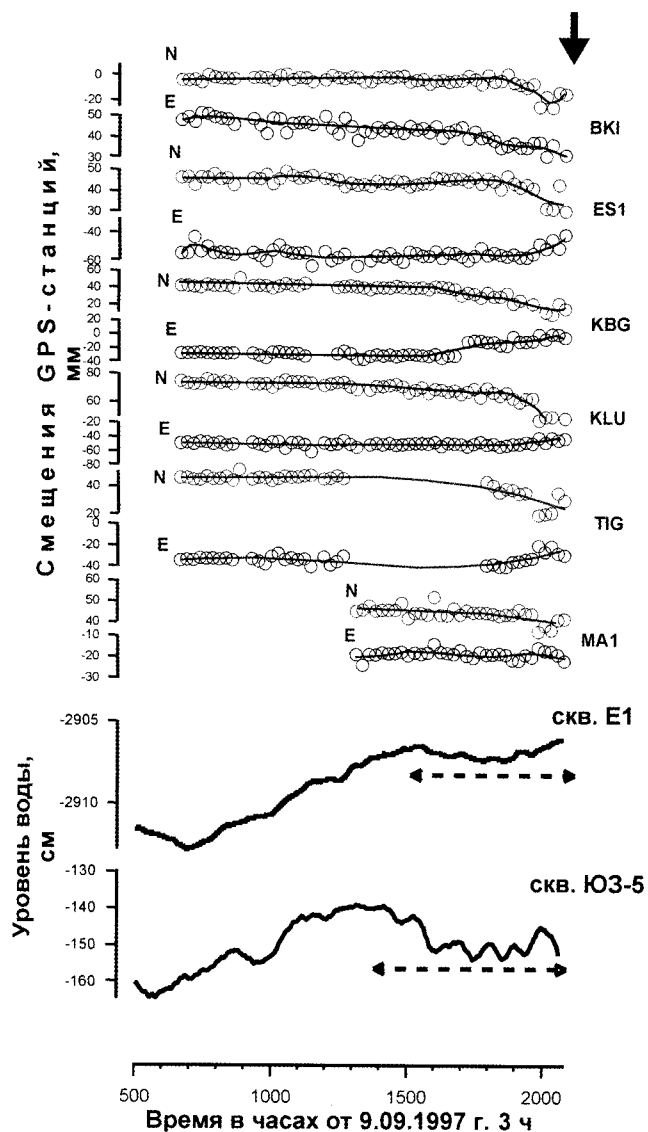


Рис. 5. Изменения уровней воды в скв. ЮЗ-5, Е1 и смещения GPS-станций на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения 5.12.97 г., $M_w=7,8$ (показано стрелкой): BK1, ES1, KBG, KLU, TIG, MA1 — GPS-станции Камчатской сети; N — смещение в направлении Ю-С, E — смещение в направлении З-В. Горизонтальными пунктирными стрелками показано время проявления гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды

среды Камчатской сейсмофокальной зоны, находящейся в состоянии предразрушения. Такие процессы были выявлены комплексом сейсмологических методов (RTL, ΔS , землетрясения-кластеры) и проявлялись в течение первых лет до возникновения сейсмических активизаций III (1992–1993 гг., три землетрясения) и IV (1996–1997 гг., четыре землетрясения).

Повторяющаяся совокупность сейсмических, деформационных и гидрогеологических процессов проявлялась на среднесрочной стадии подготовки землетрясений 6.10.1987 г. (одиночное событие), 2.03.1992 г. (первое землетрясение в группе активизации III), 5.12.1997 г. (наиболее сильное событие в группе активизации IV). Характерный интервал времени развития совокупности сейсмических, деформационных и гидрогеологических процессов, связанных с подготовкой сильных землетрясений и их групп, составляет первые годы — месяцы. При этом гидрогеологи-

ческие аномалии имеют наименьшую заблаговременность проявления перед землетрясениями — от 9 до 1 мес. Формирование гидрогеологических аномалий перед возникновением сильных землетрясений может быть связано с развитием приповерхностной («пограничной» по [1]) зоны трещинной дилатансии в водовмещающих породах, изменением их проницаемости и условий гидрогеодинамического и гидрогеохимического взаимодействия потоков подземных вод с различным химическим составом воды и газа.

На рис. 6 представлена схематическая модель, которая объясняет совокупность инструментально зафиксированных процессов с учетом современных представлений механики разрушения материалов и горных пород [1, 2] при подготовке сейсмической активизации III. В основе модели лежит представление о возникновении и развитии обширной области в южной части Авачинского залива и на Южной Камчатке в 1989–1992 гг., в пределах которой происходило ослабление сейсмического энерговыделения по механизму хрупкого разрушения. Эта область выделяется по минимальным величинам параметра RTL, указывающим на формирование в 1990–1992 гг. сейсмического затишья (рис. 3). В 1991 г. на границе этой области с континентальными районами уровень напряженного состояния среды повышался. Это проявилось в увеличении скорости горизонтальной компоненты деформации и сжатия территории Петропавловского полигона с амплитудой в первые ед. $\cdot 10^{-6}$ (рис. 4А). Рост напряжений в пограничных районах с областью сейсмического затишья сопровождался с июня 1991 г. развитием приповерхностной зоны трещинной дилатансии в насыщенных породах континентальных районов. Отражением этого процесса являются гидрогеохимические аномалии в режиме газонасыщенных термоминеральных подземных вод (рис. 4Б). Рост напряженного состояния среды на границах области сейсмического затишья проявлялся в слабой активизации сейсмичности в этих районах (формирование аномалий накопленных площадей сейсмогенных разрывов, появление землетрясений-кластеров) (рис. 3). Три сильных землетрясения 1992–1993 гг. с $M=7,1-7,4$ (группа землетрясений активизации III) возникли на северной, северо-западной и юго-западной границах области сейсмического затишья. Эти землетрясения и их афтершоки привели к разрушению области пластической диссипации тектонической энергии за счет перехода хрупкого разрушения среды на более высокий масштабный уровень. Слабое проявление аномалий в подземных водах перед землетрясениями 1993 г. указывает на понижение уровня напряженного состояния среды в континентальных районах и на ослабление или прекращение развития трещинной дилатансии в водовмещающих породах на стадии разрушения консолидированной области сейсмического затишья.

Землетрясениям сейсмической активизации IV (1.01.1996 г. и 5.12.1997 г.) также предшествовало развитие области сейсмического затишья в северных районах Камчатской сейсмоактивной зоны (рис. 3), горизонтальное сжатие территории Петропавловского полигона по светодальномерным данным (рис. 4А) и проявление гидрогеохимических аномалий в режиме самоизливающихся скв. ГК-1, Г-1 и Морозная № 1 в течение месяцев [12]. В данном случае, также как и перед землетрясениями активизации III, гидрогеохимические аномалии в режиме самоизливающихся скважин можно объяснить развитием трещинной дилатансии в водовмещающих породах водоносных систем, содержащих контрастные по минерализации подземные воды.

Второй тип (тип 2) взаимодействия гидрогеологических и деформационных процессов наблюдался в связи с краткосрочной стадией подготовки Кроноцкого землетрясения и проявился в синхронном развитии гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в двух скважинах и деформационного предвестника по данным GPS-наблюдений (рис. 5). Наиболее вероятным механизмом формирования гидрогеодинамических предвестников в этом случае является развитие преимущественно упругой деформации в водовмещающих породах (в условиях статически изолированного отклика уровня воды в скважинах на изменение напряженно-деформированного состояния среды [5]) при активизации сейсмотектонических движений в эпицентральной области.

Выводы.

1. По опубликованным данным, охарактеризованы сейсмотектонические условия Камчатского региона, особенности сейсмического режима и современных деформаций земной коры в связи с возникновением сильных ($M \geq 6,6-6,8$) землетрясений. В сейсмическом режиме Камчатки (1962–2000 гг.) выделены четыре периода сейсмических активизаций, включающих 2–4 землетрясения с $M=6,8-7,8$. Средняя продолжительность таких активизаций составляет 2,1 года.

Формирование устойчивых пространственных областей сейсмического затишья в пределах сейсмофокальной зоны и слабой активизации на стадиях подготовки сильных землетрясений рассматриваются (в соответствии с моделью С.В. Гольдина [1]) как проявление аккомодационных процессов в неоднородной среде Камчатской сейсмофокальной зоны. Такие процессы имели место в течение первых лет до возникновения сейсмических активизаций III (1992–1993 гг., три землетрясения) и IV (1996–1997 гг., четыре землетрясения).

Усилению сейсмической активности в виде сильных землетрясений за месяцы — первые годы предшествует горизонтальное сжатие континентальных районов по

геодезическим данным. Подготовка отдельных сильных землетрясений может сопровождаться аномальными движениями земной коры в течение суток-месяцев на гипоцентральных расстояниях до десятков-сотен километров.

2. Рассмотрены два возможных механизма формирования гидрогеологических предвестников:

проявление гидрогеохимических и гидрогеодинамических предвестников за счет развития трещинной дилатансии в водовмещающих породах водоносных систем, содержащих контрастные по химическому составу газонасыщенные флюиды;

проявление гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды за счет упругого деформирования водовмещающих пород при активизации сейсмотектонических движений в области будущего очага.

3. Предложена модель взаимосвязи аномальных изменений в режиме подземных вод, вариаций сейсмического режима и современных деформаций на стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений 1987–1997 гг., которая может использоваться при интерпретации данных комплексного геофизического мониторинга в целях оценки сейсмической опасности на Камчатке. Среднесрочные гидрогеологические предвестники возникают на заключительных стадиях формирования сейсмического затишья на обширных участках Камчатской сейсмофокальной зоны, во время слабой сейсмической активизации в области потенциальных очагов землетрясений. Им предшествует горизонтальное сжатие континентальных районов по геодезическим данным. Среднесрочные гидрогеологические предвестники отражают экстремальную стадию роста тектонических напряжений при подготовке сильных землетрясений и обусловлены в основном развитием приповерхностной зоны трещинной дилатансии в водовмещающих породах. На краткосрочной стадии подготовки Кроноцкого землетрясения при развитии асейсмических движений в эпицентральной зоне будущего очага проявился гидрогеодинамический предвестник в изменениях уровня воды в двух скважинах вследствие преимущественно упругой деформации водовмещающих пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология, вып. 32. — М.: ГЕОС, 2001. — С. 81–97.
2. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктура очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8. — № 1. — С. 5–14.
3. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. и др. Сейсмичность и современные границы плит и блоков Северо-Восточной Азии // Геотектоника. — 2000. — № 4. — С. 44–51.
4. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. — 2001. — № 2. — С. 39–52.
5. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. — 2006. — № 6. — С. 53–64.
6. Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. — 2006. — № 1. — Вып. 7. — С. 50–66.
7. Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. — 1994. — № 2. — С. 53–37.
8. Кравченко Н.М. Оценка эффективности прогностического параметра RTL // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. — 2005. — № 6. — С. 99–107.
9. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф. и др. Современные движения земной коры юга Камчатки и их связь с сейсмической

ХАРАКТЕРИСТИКА НАБЛЮДАЕМЫХ ПРОЦЕССОВ	ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ	СХЕМА
Образование области сейсмического затишья в Авачинском заливе и на Южной Камчатке, горизонтальное сжатие континентальных районов, 1990–1992 гг.	Формирование консолидированной области, в пределах которой преобладала пластическая диссипация сейсмотектонической энергии, активизация преимущественно асейсмических движений в СФЗ.	
Синхронные проявления аномалий в режиме подземных вод и изменений параметров слабой сейсмичности, возникновение землетрясений-кластеров на границе области сейсмического затишья, VI.1991 г.-11.1992г.	Рост напряжений на С.СЗ, ЮЗ границах области консолидации, активизация приповерхностной зоны трещинной дилатансии в континентальных районах.	
Возникновение землетрясений с $M=7,1-7,4$ и их афтершоков в краевых зонах области сейсмического затишья; увеличение числа слабых землетрясений, 111.1992г.-1993г.	Развитие хрупкого разрушения в пределах области консолидации и пограничных районов; снижение напряжений на ее границах, прекращение развитие приповерхностного слоя трещинной дилатансии.	
Образование области сейсмического затишья в Камчатском заливе (севернее Кроноцкого полуострова), 1992–1996 гг.	Формирование консолидированной области; рост напряжений на границах.	

Рис. 6. Схематическая модель процессов подготовки группы сильных землетрясений Камчатки 1992–1993 гг. (III)