

С. А. ФЕДОТОВ, Г. А. СОБОЛЕВ, С. А. БОЛДЫРЕВ, А. А. ГУСЕВ,
А. М. КОНДРАТЕНКО, О. В. ПОТАПОВА, Л. Б. СЛАВИНА,
В. Д. ФЕОФИЛАКТОВ, А. А. ХРОМОВ, В. А. ШИРОКОВ

Институт физики Земли АН СССР, Москва, СССР
Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, Петропавловск-
Камчатский, СССР

ДОЛГОСРОЧНЫЙ И ПРОБНЫЙ КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Исследования по прогнозу землетрясений начались на Камчатке в 1964 г. [7, 10, 12].

В 1971—1974 гг. проверялись и совершенствовались методы прогноза, предложенные ранее, и опробовались новые. Важный этап работ этих лет — начало пробного краткосрочного прогноза камчатских землетрясений с $M \geq 5^{1/2}$. В его основу легли данные долгосрочного прогноза и, главное, ряд предвестников, обнаруженных при сейсмических наблюдениях и изучении электротеллурического поля.

Развитие работ по долгосрочному сейсмическому прогнозу

За прошедшие годы получены новые результаты в трех направлениях. К 1965 г. составлена карта вероятных мест последующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ у берегов Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии [7, 8]. Вариант карты для 1971 г. и последующих лет составлен С. А. Федотовым [7]. Позднее эта методика применена при построении аналогичных карт для всего Тихоокеанского сейсмического пояса [11, 13].

С января 1971 по февраль 1974 г. у берегов Камчатки и Курильских островов произошло два землетрясения с $M = 7^{3/4}$; 15. XII. 1971 г. — в Камчатском заливе у северного конца Курило-Камчатской сейсмической зоны и 17. VI. 1973 г. — в районе п-ва Немуро (северо-восточная оконечность Хоккайдо) — Малых Курильских островов. Оба землетрясения попали в два места из трех, где такие землетрясения считались наиболее вероятными после 1970 г. Первоначально предполагалось, что прогноз места возникновения следующих Курило-Камчатских землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ будет в среднем оправдываться в четырех случаях из пяти. С 1965 по февраль 1974 г. он оказался верным в четырех случаях из четырех возможных.

Другие результаты, относящиеся к прогнозу места следующих сильных землетрясений, были получены при исследовании величины

$$\Theta = \lg(E_s/E_p) = K_s - K_p,$$

где E_s и E_p — энергия короткопериодных волн S и P в очагах землетрясений,

K_s и K_p — соответствующие энергетические классы.

Методика определения Θ описана С. А. Федотовым [9]. Построена карта эпицентров Камчатских землетрясений 1968—1970 гг., для которых Θ отличалась от среднего значения на величину от σ до 2σ и более. Выделены районы с преобладанием повышенных и пониженных значений Θ . Вероятно, существуют неслучайные связи этой величины со строением среды и процессами в коре и верхней мантии. В этом отношении примечательно сгущение пониженных значений (относительно слабые волны S и, возможно, более сильное отклонение свойств среды от свойств идеально упругого тела) юго-восточнее мыса Камчатского. Именно здесь позднее, 15. XII. 1971 г., оказался инструментальный эпицентр землетрясения с $M=7^{3/4}$. На юге Камчатки, где также наблюдались пониженные значения, 28. II. 1973 г. произошло землетрясение с $M=7^{1/4}$. Если эта особенность действительно имеет прогностическое значение, то потенциальными местами следующих сильных землетрясений можно считать районы мыса Кроноцкого и глубоководного желоба юго-восточнее Кроноцкого залива. Эти участки наиболее опасны и по долгосрочному прогнозу [8]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение полученных результатов и усовершенствование методики.

В результате исследований режима сильных землетрясений Курило-Камчатской и Алеутской сейсмических зон найдена закономерность, использование которой позволяет предсказывать появление «опасных» и спокойных интервалов времени, в которых вероятности сильных землетрясений различаются на порядок. В. В. Ламакин [2] выявил связь между моментами возникновения сильных байкальских землетрясений и периодами длительностью 18,6 года, изменения наклона лунной орбиты по отношению к плоскости земного экватора. В. А. Широков сделал попытку обнаружить такую связь для сильных землетрясений двух больших регионов северо-западного участка Тихоокеанского тектонического пояса: I — Алеутские острова, II — Камчатка, Курильские острова, Северо-Восточная Япония (35° — 58° с. ш.). Сводка исходных данных, составленная по различным источникам, была максимально полной. В регионе I рассматривались землетрясения с $M \geq 7$ и глубиной очага 0—70 км за 1904—1972 гг. (46 событий). В регионе II рассматривались землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$, глубиной очага 0—100 км, за 1737—1972 гг. (54 события). Во всей зоне от Алеутских островов до Северо-Восточной Японии землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$ регистрируются без пропусков с 1904 г. В регионе I нет пропусков землетрясений с $M \geq 7$ после 1922 г. В регионе II для периода до начала инструментальных наблюдений (1737—1896 гг.) в каталог включены землетрясения Курило-Камчатской зоны интенсивностью не менее 8 баллов и предположительно соответствующие в условиях этого региона магнитудам $M \geq 7^{3/4}$. Имеются данные о шести землетрясениях такой силы. С 1896 по 1904 г. нет пропусков землетрясений с $M \geq 8$.

На рис. 1 представлено распределение землетрясений внутри совмещенных друг с другом периодов длительностью 18,6 года отдельно для регионов I и II. За начало периода принятые эпохи максимального склонения Луны. Внутри периодов выделяются сейсмически активные фазы (44 события из 46 и 52 из 54), продолжительность которых составляет приблизительно две трети длительности периода. Начало фаз сейсмической активности в регионах I и II сдвинуто приблизительно на 6 лет. Контроль значимости выделения активных фаз проводился в двух вариантах. В первом варианте определены вероятности появления 44 событий из 46 и 52 из 54 в течение 0,67 продолжительности цикла. Исходя из биномиального закона с вероятностью $p=0,67$, они составляют $0,5 \cdot 10^{-5}$

и $0.5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Во втором варианте, чтобы снять искажающее влияние группирования событий, вместо чисел событий рассматривались числа групп. При этом группами считались: серия событий, интервалы между которыми не превышали 12 месяцев, или одиночное. Тогда имеем 20 групп из 22 и 15 из 17 в тех же интервалах, что соответствует вероятностям 0,01 и 0,05 соответственно. Низкие значения биномиальных вероятностей указывают, что вариации плотности событий внутри цикла реальны. Обнаруженные закономерности могут быть использованы для

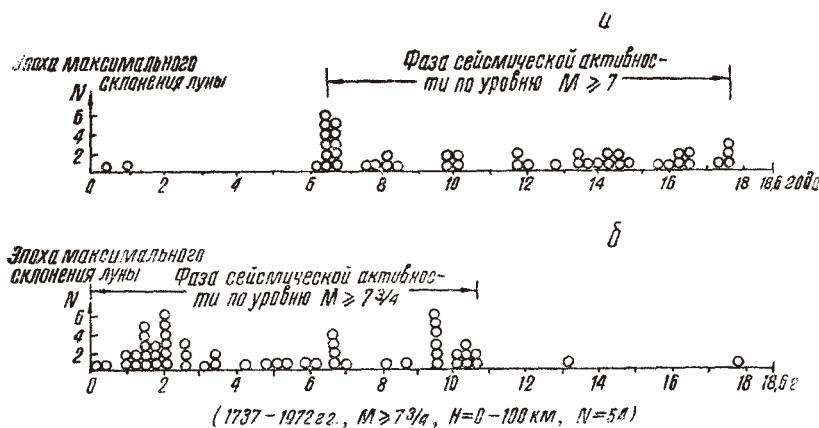


Рис. 1. Распределение сильных землетрясений по фазам периода длительностью 18,6 года, связанного с изменением наклона лунной орбиты по отношению к плоскости земного экватора:

a—для землетрясений Алеутских островов (1904—1972 гг.), $M > 7$, $H=0$ —70 км, $N=46$; *b*—для землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии (35° — 58° с. ш.) 1904—1972 гг., $M > 7\frac{3}{4}$, $H=0$ —100 км, $N=54$.

прогноза землетрясений. В регионе I ближайшую фазу сейсмической активности следует ожидать в 1975—1986 гг. В регионе II текущая фаза сейсмической активности должна закончиться в 1980 г. В 1980—1988 гг. ожидается фаза сейсмического затишья. При помощи графиков (рис. 1) выясняется, что вероятность возникновения одного или более землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$ в регионе II в 1974—1979 гг. превышает 0,95, зато в 1980—1988 гг. она меньше 0,2.

Обнаруженная закономерность существенна и для изучения геодинамики. Влияние сил лунного притяжения на перемещения вещества в сейсмическом поясе в северо-западной части Тихого океана оказалось неожиданно большим. Обращает на себя внимание то, что Курило-Камчатская и Алеутская дуги, пересекающиеся примерно под прямым углом, по-разному реагируют на изменения сил лунного притяжения. Эти явления заслуживают глубокого изучения.

Отдельно изучалось распределение во времени землетрясений Камчатки с $M \geq 7$ за 1897—1973 гг., произошедших между 49° и 58° с. ш. С 1911 г. землетрясения с $M \geq 7$ регистрируются здесь без пропусков. За этот период произошло 37 таких землетрясений, 10 из них с $M \geq 7\frac{3}{4}$; 11 землетрясений отмечены на глубине более 100 км, из них два более 300 км (340 и 590 км). На рис. 2 представлено распределение этих землетрясений внутри последовательных интервалов длительностью 6,2 года. Эти интервалы получены, исходя из отмеченного 18,6-летнего цикла. Каждый цикл содержит три одинаковых интервала: α , β , γ . Их начало и конец указаны с точностью до 0,1 года. Интервал α отсчитывается от эпохи максимального склонения Луны (звездочка). Интервалы γ пока-

зывают фазу сейсмического затишья, выделенную по землетрясениям с $M \geq 7\frac{3}{4}$ для региона II. На рис. 2 представлена гистограмма распределения камчатских землетрясений по пятимесячным интервалам внутри совмещенных друг с другом периодов длительностью 6,2 года. При

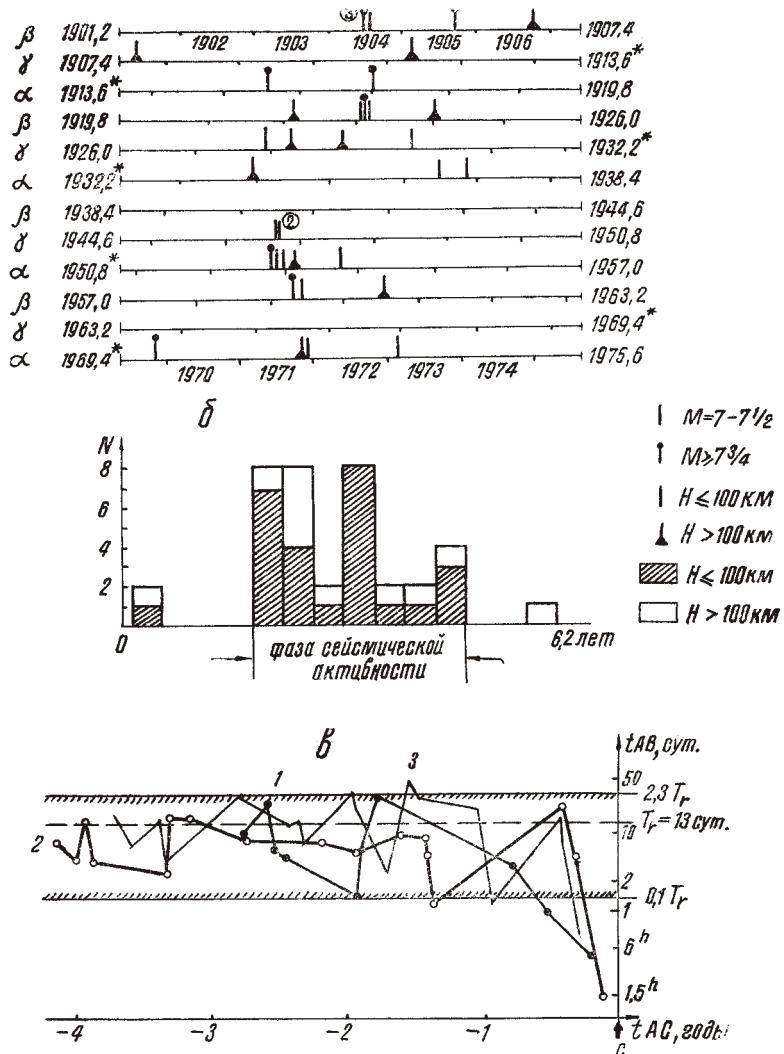


Рис. 2. Распределение во времени землетрясений Камчатки с $M \geq 7$ $H=0-600 \text{ км}$ за 1897—1973 гг. в периодах длительностью 6,2 года (a) и соответствующая гистограмма (б); поведение t_{AB} перед тремя сильными землетрясениями (в):

1—о-ва Санта-Крус 3. 12. 1966, $M=8,0$; 2—Хоккайдо 15. 05. 1968, $M=8,2$; 3—Камчатка 15. 12. 1971, $M=7,7$. Уровни $0.1 T_r$ и $2.3 T_r$ соответствуют верхней и нижней 10% границам для пуассоновского процесса

этом выявляется фаза сейсмической активности длительностью 3,1 года, в течение которой произошло 34 из 37 землетрясений и 15 из 17 групп. Биномиальные вероятности, определенные по описанной выше схеме, составляют $1 \cdot 10^{-7}$ и $2 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Существование периодичности в 6,2 года, связанной с периодом 18,6 лет, подтверждается также тем, что 9 известных наиболее сильных землетрясений Камчатки с 1737 по

1896 г. попадают в рассчитанные фазы сейсмической активности. На основе выявленной закономерности составлен прогноз времени возникновения землетрясений Камчатки до 2000 г. (табл. 1). Средняя вероятность появления одного или более «опасных» неглубоких землетрясений $p_1 (N \geq 1)$ с глубиной очага 0—100 км в каждой фазе сейсмической активности равна 0,83. Соответствующая вероятность для фазы сейсмического затишья $p_2 (N \geq 1) = 0,09$.

Сейсмичность 1973 г. соответствует сделанному прогнозу: наблюдалось землетрясение с $M=7,3$ у берегов Камчатки (28. II. 1973), землетрясение с $M=7,8$ в регионе II (17. VI. 1973), а в Алеутской зоне сильных землетрясений не отмечено.

Таким образом, по долгосрочному сейсмическому прогнозу для Камчатки в настоящее время предсказываются вероятные места будущих

Таблица 1

**Прогноз сильных землетрясений Камчатки
(49—58° с. ш.) на 1974—2000 гг. с магнитудой $M \geq 7$,
глубиной очага 0—600 км (составил
В. А. Широков, 1972)**

Фаза сейсмической активности, месяц, год	Фаза сейсмического затишья, месяц, год
III. 1977—III. 1980	II. 1974—II. 1977
VI. 1983—VI. 1986	IV. 1980—V. 1983
IX. 1989+IX. 1992	VII. 1986—VIII. 1989
XI. 1995—XI. 1998	X. 1992—X. 1995
$p_1 (N \geq 1) = 0,83$	XII. 1998—I. 2002
	$p_2 (N \geq 1) = 0,09$

землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, вероятные годы с $M \geq 7$, а также магнитуды землетрясений, которые ожидаются с вероятностью 0,5 в течение пятилетних интервалов времени в различных участках сейсмической области у берегов Камчатки, а также другие характеристики сейсмичности [10]. Имеются возможности усовершенствовать этот прогноз, используя данные о механизме очагов землетрясений, а также повторные геодезические измерения. При этом могут оказаться полезными аномальные изменения величины Θ , а также закономерная последовательность землетрясений. К обсуждению подобного рода явлений и перейдем.

А. Г. Прозоров [3] для каталога землетрясений Средней Азии выявил следующую связь между последовательными землетрясениями для трех событий A, B, C (из которых A и C — сильные землетрясения, а B — слабое), если время t_{AB} между A и B мало и расстояние d_{BC} между B и C мало, то плотность событий B превышает среднюю для событий той же силы. Иными словами, удаленное сильное событие A индуцирует слабый форшок B в зоне подготовки следующего сильного события C. Это явление было изучено А. А. Гусевым для мирового каталога и каталога землетрясений Камчатки (табл. 2).

Рассматриваемое явление можно использовать как для прогноза места землетрясения, так и для времени. Мы изучили возможность прогноза времени сильного ($M \approx 7,5—8$) землетрясения. На рис. 2, в показано поведение времен t_{AB} перед тремя сильными землетрясениями (C-событиями): 31. 12. 1966, $M=8,0$ о-ва Санта-Крус; 16. 5. 1968, $M=8,2$, Хоккайдо; 15. 12. 1971, $M=7,7$, Камчатка. Их моменты на графике совмещены.

За А-события приняты все землетрясения с $M \geq 7,5$ по земному шару, а для С-события добавлены еще с $M \geq 7,3$ в Тихоокеанском поясе к северу от экватора. По оси абсцисс отложены времена t_{AC} , по оси ординат — t_{AB} . За В-событие взято землетрясение, следующее за А: для первых двух С-событий — из Регионального каталога МСЦ в географических районах №№ 183—184 и №№ 223—224 соответственно, с $m_b > 4,0$, а для третьего С-события — из каталогов Камчатской сети, для севера Камчатки ($54^{\circ}\text{--}58^{\circ}$ с. ш.), с $K \geq 11,0$.

Таблица 2

Основные характеристики эффекта взаимосвязи между тремя последовательными землетрясениями А, В, С

Показатель	Мировой каталог	Камчатка	Средняя Азия (по Прозорову)
Магнитуда (класс) А, С	$M_S \sim 7,5\text{--}8$	$K \geq 13$	$K \geq 14$
Магнитуда (класс) В	$m_b > 4,2$	$K \geq 8$	$K \geq 9$
t_{AB}	0,1—10 сут	0,1—5 сут	—
t_{AC}	0,2—1 год	0,1—0,5 года	До года
d_{BC}	100—500 км	20—40 км	100 км
d_{AC}	Не огранич.	До 700 км	До 1000 км

Здесь и ниже для землетрясений Камчатки употребляются энергетические классы $K_{3_{1,2}}^{68}(9)$. Соответствие между $K_{1,2}^{68}$ и магнитудами M_{ECCN} следующее:

$$\begin{array}{ccccccc} K & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ m_B & 5,0 & 5,5 & 6,0 & 6,5 & 7,0 \\ M_{ECCN} & 4,9 & 5,6 & 6,3 & 6,9 & 7,5 \end{array}$$

Уровень, указанный на графике, соответствует среднему времени T между землетрясениями того списка, из которого выбирались В-события. Случайно значения T для всех трех районов оказались близкими, они равны 12—13 суткам.

Сильные землетрясения предваряются весьма низкими значениями t_{AB} (рис. 2, в). Во всех трех случаях в течение года перед сильным землетрясением наблюдалось более одного выброса за $0,1T$, а непосредственно перед землетрясением (за 1—3 месяца) выброс за $0,03 T$. Полученные результаты обнадеживают и позволяют рассчитывать в дальнейшем на использование методики в оперативном прогнозе.

Пробный краткосрочный прогноз неглубоких камчатских землетрясений с $M \geq 5^{1/2}$

При исследованиях по прогнозу землетрясений на Камчатке был найден ряд предвестников, появившихся за 5—20 дней до землетрясений. Эти предвестники легли в основу программы пробного краткосрочного прогноза неглубоких камчатских землетрясений с $K_{1,2}^{68} \geq 13$ (или $M \geq 5^{1/2}$), составленной в декабре 1971 г. С. А. Федотовым и Г. А. Соболевым. Пробный прогноз по этой программе ведется непрерывно с 1 января 1972 г. до настоящего времени. В данном сообщении кратко

описываются используемые предвестники, техника и результаты прогноза с 1 января 1972 г. по 15 апреля 1974 г.

Регистрация электротеллурического поля (ЭТП) с целью поисков предвестников сильных землетрясений проводится на восточном побережье Камчатки с 1966 г. Наблюдения ведутся сетью станций, расположенных на расстоянии 80—200 км друг от друга. Датчиками являются свинцовые электроды, заложенные на глубину 2 м и образующие пары, ориентированные в широтном и меридиональном направлениях. С целью обеспечения большей надежности исходного материала количество независимых пар на станциях составляет от 4 до 10. Станции оснащены автоматической аппаратурой, обеспечивающей регистрацию разности потенциалов на каждой линии с частотой опроса один раз в час. Проведенные исследования позволили установить характерные признаки аномалий электротеллурического поля перед землетрясениями с $K \geq 13$.

Таблица 3

Оценка результатов пробного краткосрочного прогноза землетрясений Камчатки с $K=13$

Способ	N	N_P	$L, \%$	P_P	I
ЭТП-1	14	9	42	0,64	1,54
ССС	14	5	45	0,36	0,80
Прогноз I	13	3	14	0,23	1,65
ЭТП-2	12	8	29	0,67	2,30
V_P/V_S	14	10	56	0,71	1,28
Прогноз II	12	7	22	0,58	2,64

[4—6]. Длительность аномалий меняется от 5 до 15 суток, амплитуда достигает 50 мв/200 м. Начало аномалии характеризуется большим градиентом, чем возвращение к исходному уровню. Осложняющими факторами при выделении аномалий являются: выпадение обильных осадков, таяние снега, магнитные бури, океанские приливы.

Основой выделения оперативного прогноза по способу ЭТП были графики изменения во времени среднесуточной разности потенциалов ΔU всех измерительных линий. Необходимым условием выделения аномальных изменений в качестве предвестников землетрясений была их синхронность (с точностью ± 1 сутки), по крайней мере, на параллельных линиях одной станции, а также соответствующая форма. По станции Шипунской, расположенной в центре Камчатского сейсмоактивного района, давался прогноз землетрясений. Данные других станций использовались для определения вероятного района будущего землетрясения (табл. 3).

Выделение аномальных изменений ЭТП проводилось на ЭВМ по программе В. Н. Богаевского и Г. А. Соболева. Алгоритм обработки предусматривает сглаживание высокочастотного шума и построение «нулевой» линии сезонного хода для каждой измерительной линии. Затем вычисляются отклонения реального хода ΔU от «нулевых» линий. С целью увеличения отношения сигнал/помеха производится осреднение этих отношений по всем измерительным линиям каждой станции. Для повышения устойчивости работы программы применено многократное деление аномальных изменений в электротеллурическом поле длительностью 5—20 суток. На выходе программы имеем функцию $|\Delta \bar{U}|^2$, по физическому смыслу близкую квадрату модуля напряженности электро-

тектонического поля. Повышенные значения $|\Delta \bar{U}|^2$ отвечают началу периода тревоги.

На рис. 3 приведен график $|\Delta \bar{U}|^2$ для станции Шипунской, а на рис. 4 соответствующая карта. Нумерация событий на рис. 3 и 4 согласована. Для станции Шипунской обнаружено, что для событий с $K=13$ аномалии наблюдаются в радиусе не более 250 км от станции, поэтому вне соответствующего круга события с $K=13$ на рис. 4 не приведены.

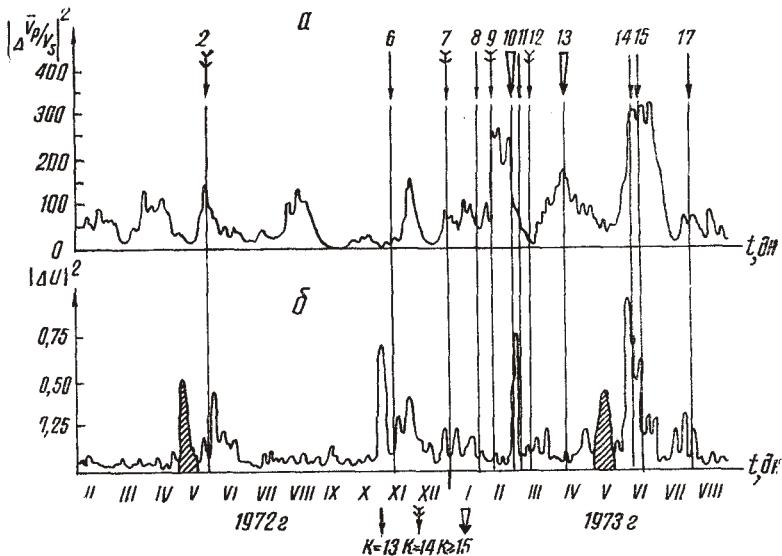


Рис. 3. Выделение предвестников землетрясений Камчатки на ЭВМ:
α—по отношению скоростей продольных и поперечных волн, β—по уровню электротеллурического поля.
Заштрихованные участки на графике $|\Delta \bar{V}|^2$ соответствуют реакции ЭТП на таяние снега. Приведенные графики относятся к станции Шипунской.

Из более сильных удаленных событий только землетрясение № 10 (28. 2. 1973 г., $M=7,3$) вызвало резкий выброс $|\Delta \bar{U}|^2$. Для других станций расстояние, на котором фиксируется подготовка землетрясения, меньше, чем для станции Шипунской.

Исследование изменения во времени и по площади отношения скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s проводится на Камчатском полигоне с 1972 г. Единичные значения параметра $\kappa = V_p/V_s$ оценивались по данным одной станции (обычно ближайшей к очагу) на основании соотношения

$$\kappa = \frac{T_{S-P}}{T_{P-0}} + 1,$$

где T_{S-P} — разность времен прихода волн P и S на данную станцию;
 T_{P-0} — время пробега волны P от источника до станции.

Момент возникновения землетрясения t_0 определялся по данным всей Камчатской сети станций. Исходным материалом для получения единичных значений являлись сведения, содержащиеся в бюллетене этой сети. Для каждой станции использовались данные землетрясений без ограничения энергетического класса и глубины в радиусе 160 км. Непрерывные наблюдения проводились по шести береговым станциям Камчатки (рис. 4, а), ближайшим к фокальной зоне. Для каждого участка

фокальной зоны имелись наблюдения не менее чем двух станций. Вероятная ошибка единичного измерения χ при независимых ошибках в t_p , t_s и t_0 ; $\sigma_p=0,3$ сек; $\sigma_s=0,3$ сек; $\sigma_0=0,5$ сек. и $T_{s-p}=8-10$ сек. составляет около 0,04. Статистическая оценка средней величины параметра χ и разброса единичных значений произведена за два года и составила $1,73 \pm 0,036$. Таким образом, обе оценки практически совпадают. Вариации параметра χ , полученные для 6 станций с 1. 1. 1971 по

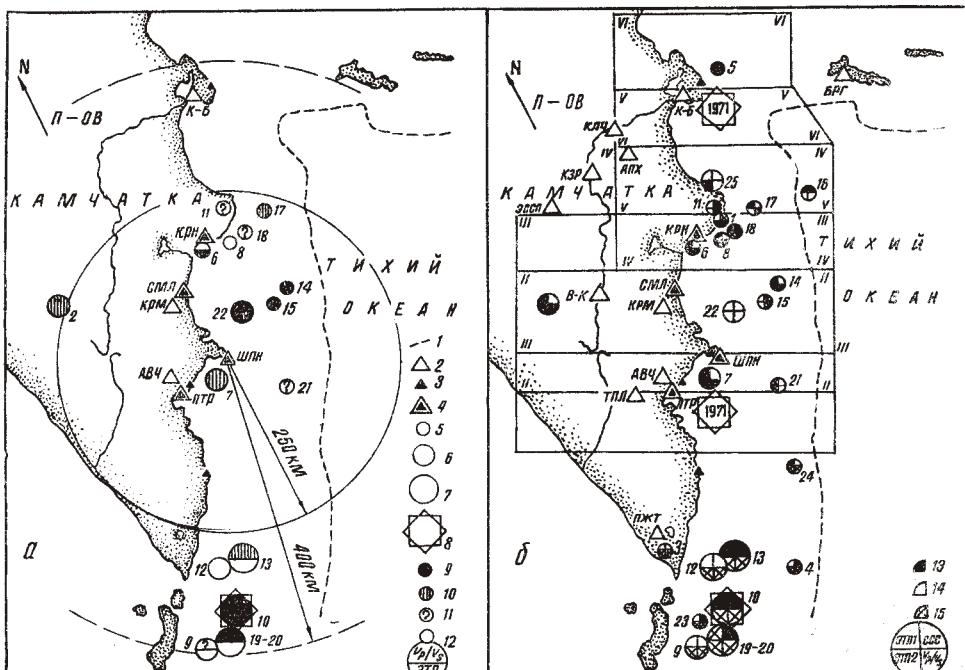


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений Камчатки, для которых изучалась связь аномалий $|\Delta \bar{V}|^2$ и $|\Delta \bar{V}_p / v_s|^2$ с последующим землетрясением (а) и делался оперативный прогноз (б).

1—ось глубоководного желоба, 2—сейсмическая станция, 3—станция ЭТП, 4—сейсмическая станция, объединенная со станцией ЭТП.

Энергетический класс землетрясений: 5— $K=13$; 6— $K=14$; 7— $K=15$; 8— $K>16$; 9—эпицентры землетрясений, перед которыми наблюдались значительные аномалии на ст. Шипунской; 10—аномалии менее отчетливые; 11—вопрос о связи максимума с данным землетрясением не решается однозначно; 12—прогностические аномалии отсутствуют; 13—тревога была, 14—тревоги не было, 15—технический пропуск. Результаты прогноза по каждому методу изображены условным знаком согласно схеме в правом нижнем углу рисунка.

20. IV. 1974 г., анализировались по площади и во времени. Поведение параметра в функции времени изменчиво; на фоне средних значений наблюдаются аномальные отклонения как в сторону больших, так и в сторону меньших значений, достигающие 12%. Сравнение времени появления аномальных значений и моментов землетрясений с $K \geq 12$ показало, что краткосрочные изменения наблюдаются в среднем за 10–20 дней до землетрясения и продолжаются после него. Поэтому появление аномальных значений χ_{max} и χ_{min} , выходящих за интервал $\pm \sigma(\chi)$, считалось предвестником землетрясения с $K \geq 13$. Тревога объявлялась с момента появления аномальных значений на 20 дней вперед (рис. 4, б, табл. 3).

Временная зависимость параметра χ анализировалась также на ЭВМ с 1. 1. 1971 по 1. IV. 1973 г. ретроспективно, а с 1. IX. 1973 г. —

прогностически. Алгоритм включает в себя вычисление разностей между текущим значением x и средним, введение весовых коэффициентов с целью уменьшения влияния случайных ошибок, раздельное суммирование x_{\min} и x_{\max} на меняющемся интервале (Соболев, Славина, 1974).

На выходе имеем величину

$$(\Delta \bar{V}_P / \bar{V}_S)^2 = \sum_{i=1}^n (\Delta x_{\min} P_i) \sum_{i=1}^n (\Delta x_{\max} P_i),$$

где P_i — вес;

n — длина интервала осреднения.

На рис. 3 приведен график функции $(\Delta V_P / V_S)^2$ для станции Шипунской с 1. II. 1972 по 31. XII. 1973 г. Стрелками отмечены моменты землетрясений. Номера стрелок соответствуют номеру землетрясения на рис. 4. Из сопоставления рис. 3 и карты эпицентров можно заключить, что большинство землетрясений с $m_b \geq 5,5$, произошедших в радиусе до 250 км от станции Шипунской, предварялось значительным возрастанием функции $(\Delta \bar{V}_P / \bar{V}_S)^2$. В тех случаях, когда в пределах Камчатки с небольшим интервалом происходило несколько землетрясений, вопрос о наличии прогностического повышения $(\Delta \bar{V}_P / \bar{V}_S)^2$ перед некоторыми из них оставался открытым. В ряде случаев отмечены значительные максимумы $(\Delta \bar{V}_P / \bar{V}_S)^2$ перед сильными землетрясениями ($K \geq 14$) юга Камчатки.

Из сопоставления графиков $(\Delta \bar{V}_P / \bar{V}_S)^2$ и $(\Delta U)^2$ (рис. 3) можно заключить, что способ электротеллурического поля дает более краткосрочные предвестники.

Сейсмостатистический способ прогноза разработан на материале каталога землетрясений Камчатки за 1965—1970 гг. [1, 10]. Для прогноза используется связь с будущим сильным землетрясением следующих величин — «предикторов», оцененных по пятидневным интервалам: оценка γ параметра распространения землетрясений по энергии; максимальный энергетический класс \tilde{K} и размах чисел землетрясений α на трех последовательных пятидневках. Эти три величины за две последовательные пятидневки использовались для прогноза сильного землетрясения в следующую пятидневку. Тревога выдавалась, если произведение отношений правдоподобия для шести указанных величин превышало заданный уровень.

Пробный краткосрочный прогноз землетрясений Камчатки проводился в двух вариантах: прогноз времени землетрясения с $K \geq 13$ для всего региона в целом (прогноз I) и прогноз времени и места землетрясения с $K \geq 13$ (прогноз II). Для проведения прогноза II регион был условно разбит на перекрывающиеся участки (см. рис. 4, б).

Материалы для ведения прогноза поступали с 13—15 сейсмических станций и 5 пунктов регистрации электротеллурического поля. Операторы станций ежедневно 17 часов передавали по радиосвязи время вступлений P - и S -волн, энергетический класс землетрясений и среднесуточные значения потенциалов ЭТП за минувшие сутки по состоянию на 8 часов местного времени. По этим данным с использованием сейсмограмм станции «Петропавловск» определялись параметры землетрясений — время в очаге, координаты и энергия, строились графики изменения ЭТП для различных районов. К концу 1972 г. тщательная калибровка аппаратуры сейсмических станций закончилась, после чего

улучшилась точность определения энергетических классов землетрясений.

В прогнозе I использовались данные способа ЭТП по материалам станции Шипунской, расположенной над выходом фокальной зоны на поверхность, и сейсмостатического способа (ССС). Прогноз II делался по данным способов отношения скоростей (V_s/V_p) и ЭТП, наблюдениям на станциях, расположенных в непосредственной близости к району, для которого производилась оценка. В обоих случаях прогноз «тревога» давался при совпадении прогнозов «тревога» по двум способам. В других случаях выдавался прогноз «нет тревоги». Два раза в неделю группой сотрудников обсуждалось окончательное решение и фиксировалось в протоколе. Всего с 1. I. 1972 г. по 20. IV. 1974 г. проведено и запротоколировано 235 совещаний и соответственно дано 235 оценок сейсмической обстановки. Таким образом, прогноз выдавался за 3 или 4 дня вперед. В некоторые интервалы времени прогнозы I или II прерывались по техническим причинам (настройка аппаратуры на станциях, перебои в радиосвязи и т. п.).

В процессе проведения работ методика прогноза существенно не менялась; небольшие усовершенствования касались правил объявления и снятия тревоги и перевода прогноза по способу V_p/V_s на ЭВМ.

На карте (рис. 4, б) приведены землетрясения с $K \geq 13$ за указанный период в регионе, для которого давался прогноз (всего 15 землетрясений), а также для района очага землетрясения 28. II. 1973 г. $M = 7,3$ (№ 10). Оказалось, что часть использованных параметров реагировала на подготовку землетрясений в этом районе. Землетрясения пронумерованы по порядку их возникновения. Черный сектор в кружке (рис. 4, б) указывает на наличие, а белый на отсутствие тревоги во время данного землетрясения по разным методам в пробном краткосрочном прогнозе. Технические пропуски отмечены косым крестом. Для численной оценки способов результаты сведены в табл. 3. При этом приняты следующие обозначения: N — число землетрясений с $K \geq 13$, произошедших за время, на которое давались прогнозы данным способом; N_p — число предсказанных землетрясений; $L = (\sum T_a)/T$ — отношение суммарного времени тревог $\sum T_a$ к общему времени ведения прогноза T для прогноза I; $L = (\sum T_a D_a)/TD$ — отношение суммы произведений времени тревог T_a на длину района тревоги вдоль фокальной зоны D_a к произведению общего времени прогноза T на длину региона D для прогноза II; $P_p = N_p/N$ — вероятность обнаружения; $I = P_p/L$ — эффективность прогноза (отношение плотности землетрясений во время тревог к средней). При всех расчетах технические пропуски исключались.

Наиболее эффективно по показателю I работал способ электротеллурического поля (табл. 3). Весьма существенна, на наш взгляд, наметившаяся тенденция увеличения I при комплексировании способов. Особенно парадоксальным кажется возрастание I в прогнозе I, так как один из способов (ССС) дал результат на уровне случайного угадывания ($I=0,8$). Такое увеличение I по сумме способов объясняется резким сокращением времени ложных тревог. Таким образом, комплексирование различных способов кажется одним из наиболее обещающих путей для повышения эффективности прогноза.

Сейсмостатический способ дал хорошие результаты во время его испытаний в 1970—1971 гг. При составлении текущих прогнозов по оперативным, передаваемым по радио данным, в 1972—1974 гг. он работал плохо. Для того, чтобы проверить, не зависело ли это от неполноты или

ошибок поступавших данных, был сделан ретроспективный прогноз по уточненным, окончательным результатам за 1972—1973 гг. Прогноз от этого не улучшился. Возможные причины такого явления — вариации статистических свойств процесса и низкая точность оценки отношений правдоподобия по малым выборкам. Анализ показал, что обе эти причины сыграли определенную роль. В частности, лучшие результаты для 1970—1971 гг. были связаны с заметно большей степенью группирования во времени сильных землетрясений (не считая афтершоков) в этот период по сравнению с 1972—1973 гг. Оказалось также, что части ошибок можно избежать, выбрав переменный интервал времени для построения оценок. Было рассмотрено несколько вариантов улучшения алгоритма, использующих только предиктор γ . Тревога дается по пониженным значениям $\gamma = 0,3 - 0,35$. При этом получается значение относительного времени тревоги $L = 30\%$ и эффективности $I = 2 - 2,5$. По-видимому, такой порядок величин для данного способа — предельный.

Пробный краткосрочный прогноз землетрясений Камчатки с $K \geq 13$ ($M \geq 5^{1/2}$) преследовал главным образом научные цели. Основной его задачей было изучение возможности прогноза времени и места землетрясений по ранее обнаруженным предвестникам как сейсмическим, так и электротеллурическим. Главный итог двухлетнего прогноза — возможность предсказания возникновения землетрясений с $K \geq 13$ за 3—5 дней до них с вероятностью, в 2 раза превышающей случайное угадывание. Краткосрочный прогноз времени и места землетрясений, проводившийся на Камчатке непрерывно в течение двух лет, был, насколько нам известно, первой попыткой организации и систематического ведения прогноза такого рода.

Эффективность применявшегося комплекса способов слишком мала для практических целей, так как точность предсказания времени составляет несколько суток, места — 10^4 км^2 , а достоверность прогноза невелика. По-видимому, надежность прогноза не может быть сильно увеличена без установления физической природы ранее обнаруженных предвестников и привлечения новых (геодезических, сейсмологических), позволяющих лучше находить район подготовки землетрясения и следить за изменением напряженного состояния в нем. Для улучшения точности предсказания времени целесообразно продолжать поиск более краткосрочных предвестников, в частности, в электромагнитном поле. Если удастся найти еще два-три способа краткосрочного прогноза землетрясений с $K \geq 13$ ($M \geq 5^{1/2}$), предсказывающих землетрясение хотя бы с той же вероятностью, в 1,5—2 раза превышающей случайное угадывание, то краткосрочный прогноз станет полезным для практики.

Таким образом, к маю 1974 г. на Камчатке составлен работающий долгосрочный прогноз места и времени сильнейших землетрясений, достигнуты первые успехи в краткосрочном прогнозе умеренных и сильных землетрясений и имеется возможность улучшить оба вида прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

- Гусев А. А. Прогноз землетрясений по данным о слабой сейсмичности. В сб. «Сейсмичность, сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом». Новосибирск, Изд-во «Наука», 1974.
- Ламакин В. В. О периодичности байкальских землетрясений. ДАН СССР, т. 176, 1966, № 2.
- Прозоров А. Г., Ранцман Е. Я. Статистика землетрясений и морфоструктуры Востока Средней Азии. ДАН СССР, т. 207, 1972, № 2.

4. Соболев Г. А. Перспективы оперативного прогноза землетрясений по электротеллурическим наблюдениям. В сб. «Предвестники землетрясений», ВИНИТИ, 1973.
5. Соболев Г. А., Морозов В. Н., Мигунов Н. И. Электротеллурическое поле и сильное землетрясение на Камчатке. «Изв. АН СССР», физика Земли, 1972, № 2.
6. Соболев Г. А., Славина Л. Б. Быстрые изменения электрических и сейсмических свойств среды в сейсмоактивном районе. ДАН СССР, 1974, № 5.
7. Федотов С. А. О закономерностях размещения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии. Труды Института физики Земли АН СССР, № 36 (203), 1965.
8. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном прогнозе В сб. «Сейсмическое районирование СССР», М., Изд-во «Наука», 1968.
9. Федотов С. А., Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М., Изд-во «Наука», 1972.
10. Fedotov S. A., Gusev A. A., Boldyrev S. A. Progress of Earthquake Prediction in Kamchatka. Tectonophysics 14(3/4), 1972.
11. Kelleher J., Sykes L., Oliver J. Possible Criteria for Predicting Earthquake Locations and their Application to Major Plate Boundaries of the Pacific and the Caribbean. J. Geophys. Res., v. 78, No 14, 1973.
12. Myachkin V. J., Sobolev G. A., Dolbilkina N. A., M;ο;r;o;z;o;v V. N., Preobrazhensky, V. B. The study of variations in geophysical fields near focal zones of Kamchatka. Tectonophysics, 14 (3/4), 1972.
13. Sykes L. R., Aftershocks Zones of Great Earthquakes, Seismicity Gaps and Earthquake Prediction for Alaska and the Aleutians. J. Geophys. Res., v. 76, No 32, 1972.

S. A. Fedotov, G. A. Sobolev, S. A. Boldyrev, A. A. Gusev, A. M. Kondratenko, O. V. Potapova, L. B. Slavina, V. D. Pheophilactov, A. A. Khromov, V. A. Shirokov. Long-term and trial short-term prediction of Kamchatka earthquakes.

In 1966 the proving-ground for earthquake prediction studies was organized in Kamchatka. Here the search for large earthquake forerunners using seismological, electromagnetic and geodetic observations has been carried out jointly by the Institute of Physics of the Earth, U.S.S.R. Acad. Sci. and the Institute of Volcanology of the Far East Science Center, U.S.S.R. Acad. Sci. By 1971 the following forerunners were found for Kamchatka earthquakes: electrotelluric field anomalies, anomalous changes in V_p/V_s ratio and variations in seismostatistical parameters. This allowed us to start a trial short-term prediction of the Kamchatka earthquakes.

Short-term earthquake prediction at present stage is of low practical value. To increase its accuracy substantially the search for new indicator-forerunners to earthquakes is needed.