

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ И ПРОГНОЗИРУЕМОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННОГО В 1958–1961 гг. (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ П.И. ТОКАРЕВА)

© 2014 г. А. И. Малышев

В первые годы исторических извержений влк. Безымянного было установлено наличие перед ними длительной сейсмической подготовки. Отмечался рост частоты землетрясений и так называемых условных деформаций¹. Эти закономерности были подмечены еще в 1959 г. [8, 12], что позволило предвидеть последующие извержения влк. Безымянного приблизительно за неделю до их начала.

По ходу нарастания сейсмической активности исследователи делали выводы о состоянии вулкана и приближении времени извержения [10]. Так, о приближении извержения, происшедшего 28–30 октября 1959 г., еще 26 октября было сообщено геологической группе вулканологической станции, которая утром 29 октября выехала в район вулкана для наблюдения за его состоянием. О скором начале извержения влк. Безымянного, происшедшего 13–14 апреля 1960 г., было известно уже 8 апреля.

В период сейсмической подготовки извержения влк. Безымянного, происшедшего 25–28 марта 1961 г., исследователи считали, что извержение произойдет между 29 марта и 6 апреля. Однако нарастание условных деформаций происходило быстрее, а частота землетрясений возрастала медленнее, чем ожидалось. Извержение началось раньше – 25, а не 29 марта, как предполагалось.

К лету 1961 г. был накоплен обширный материал по сейсмической активности влк. Безымянного в период, последовавший за гигантским его извержением в 1956 г. В 1957–1961 гг. отмечено семь циклов вулканической активности, сопровождавшихся довольно сильными извержениями. В результате обработки этих данных П.И. Токаревым [10] было установлено, что накопление условных деформаций ε под вулканом перед извержением происходит по гиперболическому закону $\varepsilon = a + b / (T - t)$, где T – момент извержения, t – текущее время, a и b – эмпирические константы, причем коэффициент b почти одинаков в различных циклах вулканической активности.

Однако сразу после этих выводов режим извержений вулкана изменился: кратковременные импульсы мощной эксплозивной активности, разделявшиеся периодами покоя и предвещавшиеся длительной и хорошо выраженной сейсмической подготовкой, сменились практически непрерывным экструзивным извержением [4]. В связи с этим зависимости П.И. Токарева, полученные в результате пятилетних наблюдений, потеряли актуальность как минимум на десятилетие и сейчас не используются в практике прогнозных работ (см., например, [9]).

С середины 1970-х гг. импульсный характер вулканической активности Безымянного возобновился, но сейсмическая подготовка извержений была уже не так хорошо выражена, как раньше, и закономерности предкульминационной активизации вулкана перестали привлекать внимание исследователей. В 1980-е гг. автор этих строк, изучая деформации постройки вулкана перед эксплозивно-эффузивными кульминациями его извержений, установил факт близкого к гиперболическому приращению объемов постройки вулкана, что позволило сделать ряд успешных кратко- и среднесрочных прогнозов [2]. В начале 1990-х гг. на основании обобщения этих и подобных закономерностей предложено [3] нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, которое своими частными решениями охватывает и закономерности П.И. Токарева, и закономерности, установленные автором, описывая динамику саморазвивающихся природных процессов [5]:

$$d^2x/dt^2 = k[(dx/dt)^\lambda - (dx/dt)_0^{\lambda/a\lambda}], \quad (1)$$

где x – любая неубывающая количественная ха-

Рис. 1. Динамика и прогнозируемость сейсмической активности влк. Безымянного в 1957–1961 гг.

Анализируемые параметры: a – N (суммарное количество зарегистрированных сейсмических событий), b – D (накопленные условные деформации), v – E (суммарная энергия землетрясений). Горизонтальными линиями показаны временные интервалы и коэффициенты упорядоченности (K_n) выявленных последовательностей, номера последовательностей соответствуют их количественным характеристикам в табл. 1. Треугольниками показаны положение прогнозных определений во времени и прогнозная дистанция ($\Delta T_{пр}$) в сутках, ориентировка треугольников вверх соответствует прогнозам на затухание, вниз – на затухание.

¹ Условные деформации – термин, предложенный в середине XX в. американским сейсмологом Хуго Бенг-оффом [1] для характеристики упругих деформаций горных пород по энергии землетрясений, количественно соответствует сумме квадратных корней из энергии землетрясений.

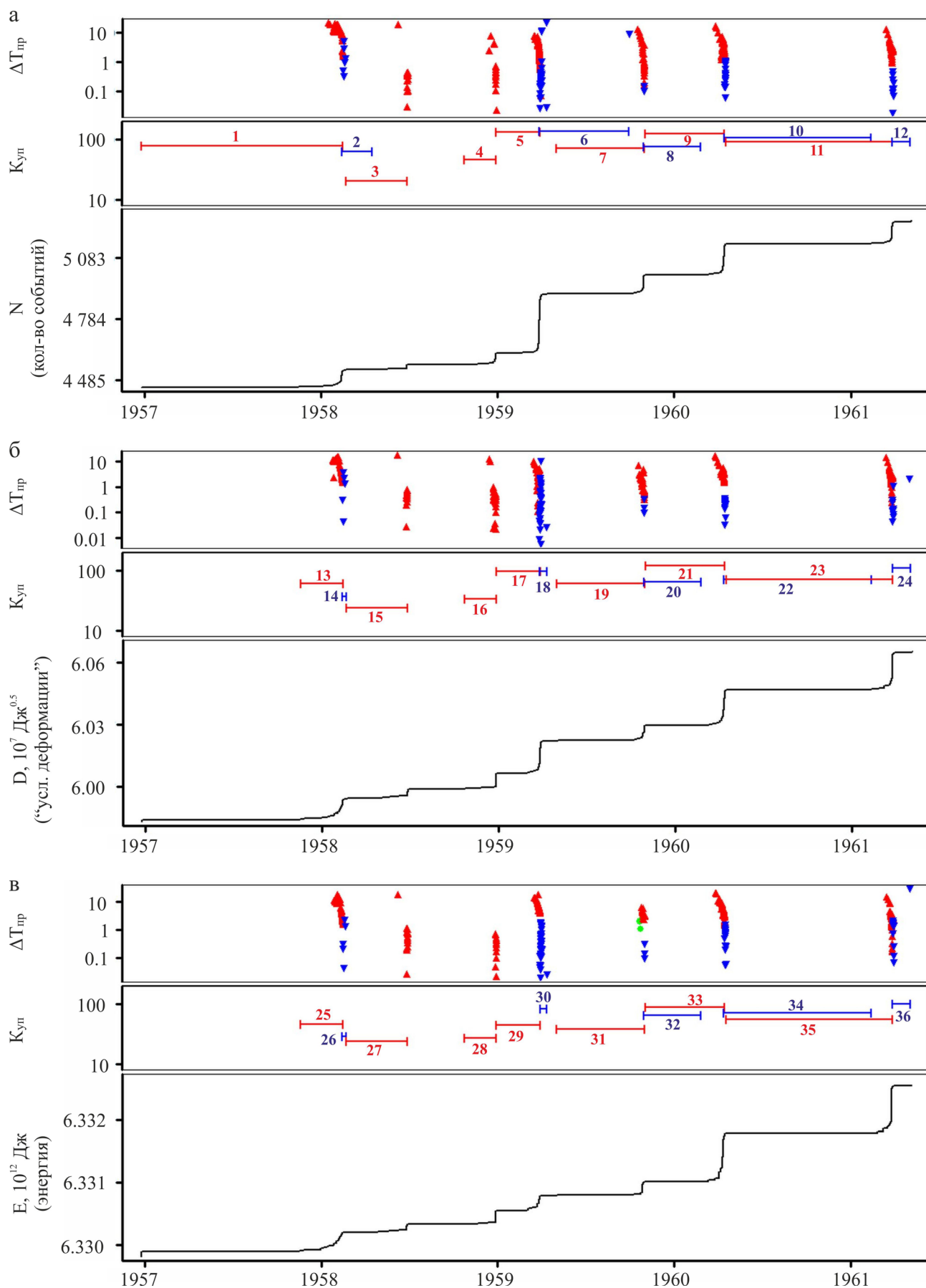


Таблица 1. Параметры наиболее упорядоченных сейсмических последовательностей в извержениях 1958–1961 гг.

№	P	N _{нач}	T _{нач}	N _{кон}	T _{кон}	α	k	T _a	X _a	K _{уп}	Аппроксимационная зависимость
1	N	4449	25.12.1956 9:34	4527	14.02.1958 12:45	1.5640	1.3760·10 ⁻¹	16.02.1958 1:34	4.4470·10 ³	1.8880	$x = 4.4470 \cdot 10^3 + 1.2024 \cdot 10^2 \times T_a - t ^{-0.7731}$
2	N	4486	12.02.1958 21:00	4535	17.04.1958 2:02	1.4977	-4.2850·10 ⁻¹	12.02.1958 10:04	4.5352·10 ³	1.8020	$x = 4.5352 \cdot 10^3 - 2.2099 \cdot 10 \times T_a - t ^{-1.0092}$
3	N	4534	20.02.1958 23:26	4559	28.06.1958 5:18	2.0000	3.6210·10 ⁻¹	28.06.1958 5:22	-2.5928·10 ⁶	1.3050	$x = 4.5429 \cdot 10^3 - \ln T_a - t /0.3621$
4	N	4561	23.10.1958 4:00	4617	28.12.1958 3:07	1.7844	2.1280·10 ⁻¹	28.12.1958 4:54	4.5488·10 ³	1.6670	$x = 4.5488 \cdot 10^3 + 3.5652 \cdot 10 \times T_a - t ^{-0.2749}$
5	N	4617	28.12.1958 3:07	4813	28.03.1959 21:35	1.4410	2.0730·10 ⁻¹	29.03.1959 17:42	4.6156·10 ³	2.1230	$x = 4.6157 \cdot 10^3 + 1.7904 \cdot 10^2 \times T_a - t ^{-1.2676}$
6	N	4763	28.03.1959 13:32	4909	29.09.1959 17:16	1.2490	-4.2380·10 ⁻¹	25.03.1959 22:17	4.9090·10 ³	2.1400	$x = 4.9090 \cdot 10^3 - 2.7721 \cdot 10^3 \times T_a - t ^{-3.0161}$
7	N	4908	02.05.1959 18:48	4994	30.10.1959 13:00	1.5251	2.0840·10 ⁻¹	31.10.1959 8:02	4.9065·10 ³	1.8580	$x = 4.9065 \cdot 10^3 + 7.4731 \cdot 10^1 \times T_a - t ^{-0.9044}$
8	N	4944	29.10.1959 16:30	5001	23.02.1960 23:47	1.2115	-1.2160	28.10.1959 8:42	5.0010·10 ³	1.8810	$x = 5.0010 \cdot 10^3 - 1.6480 \cdot 10^2 \times T_a - t ^{-3.7281}$
9	N	5000	02.11.1959 13:21	5125	13.04.1960 12:51	1.5012	1.7000·10 ⁻¹	14.04.1960 11:45	4.9983·10 ³	2.0950	$x = 4.9983 \cdot 10^3 + 1.3679 \cdot 10^2 \times T_a - t ^{-0.9952}$
10	N	5062	12.04.1960 9:09	5154	09.02.1961 9:02	1.2112	-6.0500·10 ⁻¹	09.04.1960 16:27	5.1540·10 ³	2.0280	$x = 5.1540 \cdot 10^3 - 4.5557 \cdot 10^3 \times T_a - t ^{-3.7348}$
11	N	5153	15.04.1960 19:33	5243	26.03.1961 19:36	1.5227	2.0130·10 ⁻¹	27.03.1961 12:45	5.1517·10 ³	1.9620	$x = 5.1517 \cdot 10^3 + 8.1345 \cdot 10^1 \times T_a - t ^{-0.9131}$
12	N	5184	25.03.1961 11:17	5261	01.05.1961 6:48	1.0860	-8.6700·10 ⁻¹	16.03.1961 9:35	5.2610·10 ³	1.9570	$x = 5.2610 \cdot 10^3 - 1.2129 \cdot 10^{12} \times T_a - t ^{-10.628}$
13	D	4451	18.11.1957 16:01	4527	14.02.1958 12:45	1.5458	1.5890·10 ⁻³	20.02.1958 17:10	5.9818·10 ⁷	1.7850	$x = 5.9818 \cdot 10^7 + 4.8934 \cdot 10^5 \times T_a - t ^{-0.8322}$
14	D	4486	12.02.1958 21:00	4534	20.02.1958 23:26	1.2983	-8.9040·10 ⁻²	11.02.1958 8:35	5.9930·10 ⁷	1.5700	$x = 5.9930 \cdot 10^7 - 8.1466 \cdot 10^4 \times T_a - t ^{-2.3523}$
15	D	4534	20.02.1958 23:26	4559	28.06.1958 5:18	1.9641	2.2160·10 ⁻⁴	28.06.1958 5:46	5.9785·10 ⁷	1.3810	$x = 5.9785 \cdot 10^7 + 1.7219 \cdot 10^5 \times T_a - t ^{-0.03724}$
16	D	4561	23.10.1958 4:00	4617	28.12.1958 3:07	1.7316	1.4330·10 ⁻³	28.12.1958 3:55	5.9972·10 ⁷	1.5320	$x = 5.9973 \cdot 10^7 + 3.2214 \cdot 10^4 \times T_a - t ^{-0.3669}$
17	D	4617	28.12.1958 3:07	4813	28.03.1959 21:35	1.5471	3.3480·10 ⁻³	29.03.1959 20:55	6.0052·10 ⁷	1.9850	$x = 6.0052 \cdot 10^7 + 1.2164 \cdot 10^5 \times T_a - t ^{-0.8278}$
18	D	4763	28.03.1959 13:32	4906	11.04.1959 16:56	1.1605	-2.5580·10 ⁻¹	24.03.1959 16:29	6.0219·10 ⁷	1.9910	$x = 6.0219 \cdot 10^7 - 8.3341 \cdot 10^7 \times T_a - t ^{-5.2305}$
19	D	4908	02.05.1959 18:48	4994	30.10.1959 13:00	1.5535	3.4500·10 ⁻³	31.10.1959 21:58	6.0218·10 ⁷	1.7870	$x = 6.0218 \cdot 10^7 + 1.0134 \cdot 10^5 \times T_a - t ^{-0.8067}$
20	D	4944	29.10.1959 16:30	5001	23.02.1960 23:47	1.2659	-2.0600·10 ⁻¹	28.10.1959 19:28	6.0296·10 ⁷	1.8130	$x = 6.0296 \cdot 10^7 - 2.0087 \cdot 10^4 \times T_a - t ^{-2.7608}$
21	D	5000	02.11.1959 13:21	5125	13.04.1960 12:51	1.3761	9.7480·10 ⁻³	17.04.1960 17:26	6.0294·10 ⁷	2.0830	$x = 6.0294 \cdot 10^7 + 1.8055 \cdot 10^6 \times T_a - t ^{-1.6589}$
22	D	5051	11.04.1960 22:18	5154	09.02.1961 9:02	1.2284	-1.1190·10 ⁻¹	09.04.1960 7:26	6.0476·10 ⁷	1.8550	$x = 6.0476 \cdot 10^7 - 2.7772 \cdot 10^6 \times T_a - t ^{-3.3783}$
23	D	5153	15.04.1960 19:33	5243	26.03.1961 19:36	1.4872	4.6790·10 ⁻³	28.03.1961 1:27	6.0473·10 ⁷	1.8530	$x = 6.0473 \cdot 10^7 + 2.5169 \cdot 10^5 \times T_a - t ^{-1.0525}$
24	D	5184	25.03.1961 11:17	5261	01.05.1961 6:48	1.1795	-2.6570·10 ⁻¹	23.03.1961 5:41	6.0661·10 ⁷	2.0430	$x = 6.0661 \cdot 10^7 - 5.0390 \cdot 10^6 \times T_a - t ^{-4.5710}$
25	E	4451	18.11.1957 16:01	4527	14.02.1958 12:45	1.3619	2.4440·10 ⁻⁴	13.03.1958 13:30	6.3302·10 ¹²	1.6620	$x = 6.3302 \cdot 10^{12} + 8.9905 \cdot 10^{10} \times T_a - t ^{-1.7632}$
26	E	4509	13.02.1958 8:42	4534	20.02.1958 23:26	1.3579	-7.5920·10 ⁻³	12.02.1958 17:54	6.3305·10 ¹²	1.4620	$x = 6.3305 \cdot 10^{12} - 8.2306 \cdot 10^6 \times T_a - t ^{-1.7941}$
27	E	4534	20.02.1958 23:26	4560	28.06.1958 11:34	1.8403	6.7130·10 ⁻⁷	28.06.1958 15:59	6.3304·10 ¹²	1.3790	$x = 6.3304 \cdot 10^{12} + 1.4366 \cdot 10^8 \times T_a - t ^{-0.1900}$
28	E	4561	23.10.1958 4:00	4617	28.12.1958 3:07	1.6186	3.1380·10 ⁻⁵	28.12.1958 6:13	6.3306·10 ¹²	1.4310	$x = 6.3306 \cdot 10^{12} + 6.7163 \cdot 10^7 \times T_a - t ^{-0.6166}$
29	E	4617	28.12.1958 3:07	4813	28.03.1959 21:35	1.2127	5.6230·10 ⁻³	20.04.1959 2:20	6.3308·10 ¹²	1.6440	$x = 6.3308 \cdot 10^{12} + 1.4809 \cdot 10^{13} \times T_a - t ^{-3.7015}$
30	E	4778	28.03.1959 16:01	4906	11.04.1959 16:56	1.2499	-2.9310·10 ⁻²	27.03.1959 7:09	6.3310·10 ¹²	1.9210	$x = 6.3310 \cdot 10^{12} - 1.1666 \cdot 10^8 \times T_a - t ^{-3.0016}$
31	E	4908	02.05.1959 18:48	4993	30.10.1959 11:01	1.5610	4.6250·10 ⁻⁵	31.10.1959 3:06	6.3310·10 ¹²	1.5790	$x = 6.3310 \cdot 10^{12} + 1.9101 \cdot 10^8 \times T_a - t ^{-0.7825}$
32	E	4944	29.10.1959 16:30	5001	23.02.1960 23:47	1.3209	-1.7860·10 ⁻²	29.10.1959 5:31	6.3311·10 ¹²	1.8140	$x = 6.3312 \cdot 10^{12} - 4.5736 \cdot 10^6 \times T_a - t ^{-2.1162}$
33	E	5000	02.11.1959 13:21	5122	13.04.1960 9:46	1.1998	7.2610·10 ⁻³	29.04.1960 1:33	6.3311·10 ¹²	1.9490	$x = 6.3312 \cdot 10^{12} + 4.0146 \cdot 10^{13} \times T_a - t ^{-4.0050}$
34	E	5051	11.04.1960 22:18	5154	09.02.1961 9:02	1.2833	-8.7030·10 ⁻³	10.04.1960 8:45	6.3318·10 ¹²	1.8480	$x = 6.3318 \cdot 10^{12} - 6.3533 \cdot 10^8 \times T_a - t ^{-2.5298}$
35	E	5153	15.04.1960 19:33	5238	26.03.1961 13:26	1.4684	1.2220·10 ⁻⁴	27.03.1961 23:13	6.3318·10 ¹²	1.7440	$x = 6.3318 \cdot 10^{12} + 1.0048 \cdot 10^9 \times T_a - t ^{-1.1349}$
36	E	5187	25.03.1961 13:05	5261	01.05.1961 6:48	1.3456	-6.0450·10 ⁻³	25.03.1961 7:12	6.3324·10 ¹²	2.0030	$x = 6.3325 \cdot 10^{12} - 3.0022 \cdot 10^7 \times T_a - t ^{-1.8935}$

Примечание. Р – анализируемый параметр; N_{нач} и T_{нач} – порядковый номер (по каталогу П.И. Токарева [11]) и время начального события в последовательности; N_{кон} и T_{кон} – порядковый номер и время конечного события в последовательности; α, k, T_a, X_a – параметры уравнения СРП для аппроксимационной зависимости; K_{уп} – коэффициент упорядоченности.

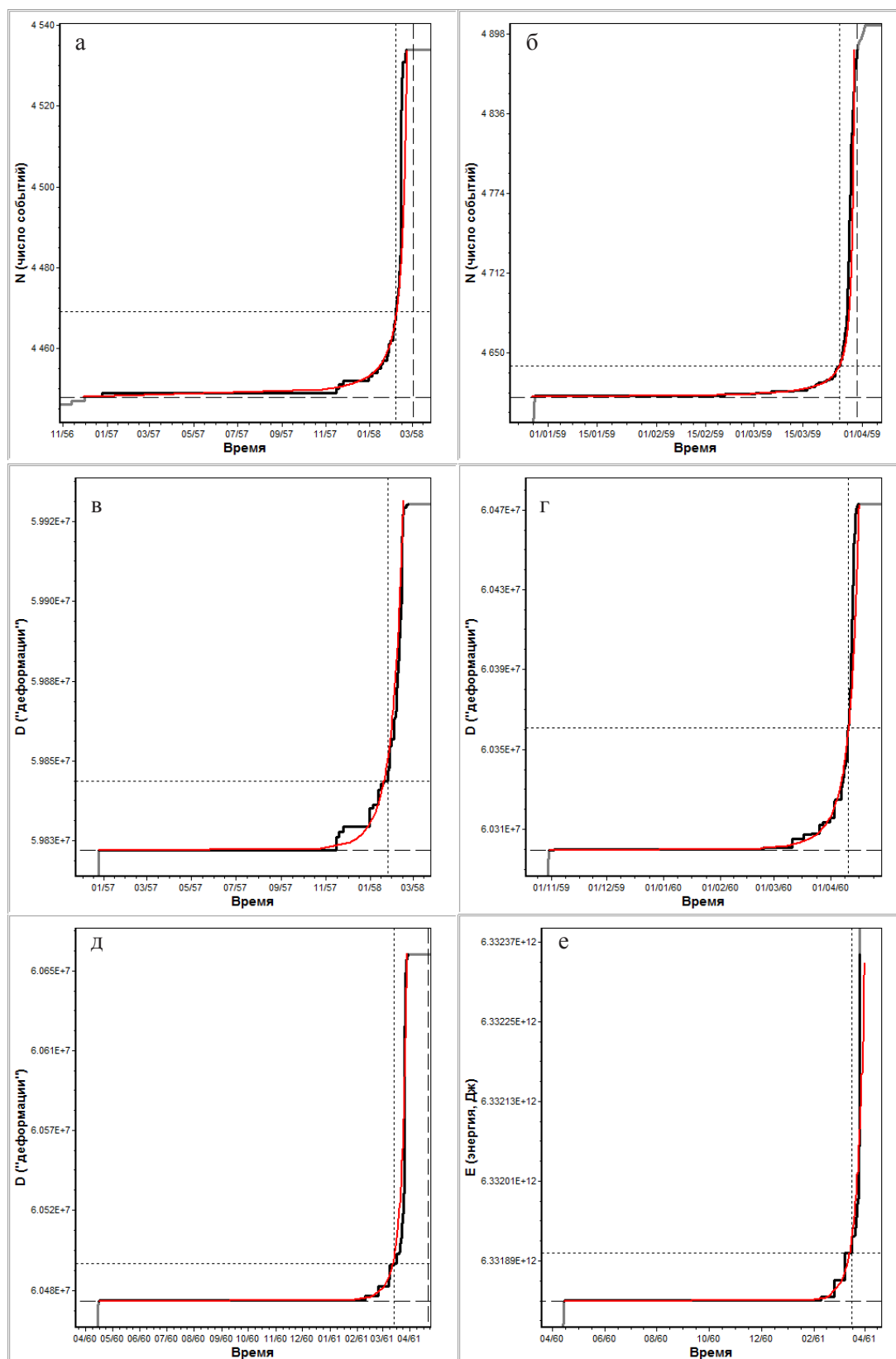


Рис. 2. Примеры ретроспективного прогноза для влк. Безымянного.

а – последовательность № 1 в табл. 1, б – № 5, в – № 13, г – 21, д – № 23, е – № 35. Пересечение точечных пунктирных линий соответствует текущему положению на момент ретропрогноза (левее и ниже – прошлое, правее и выше – будущее), длинные пунктирные линии отражают асимптотику процесса.

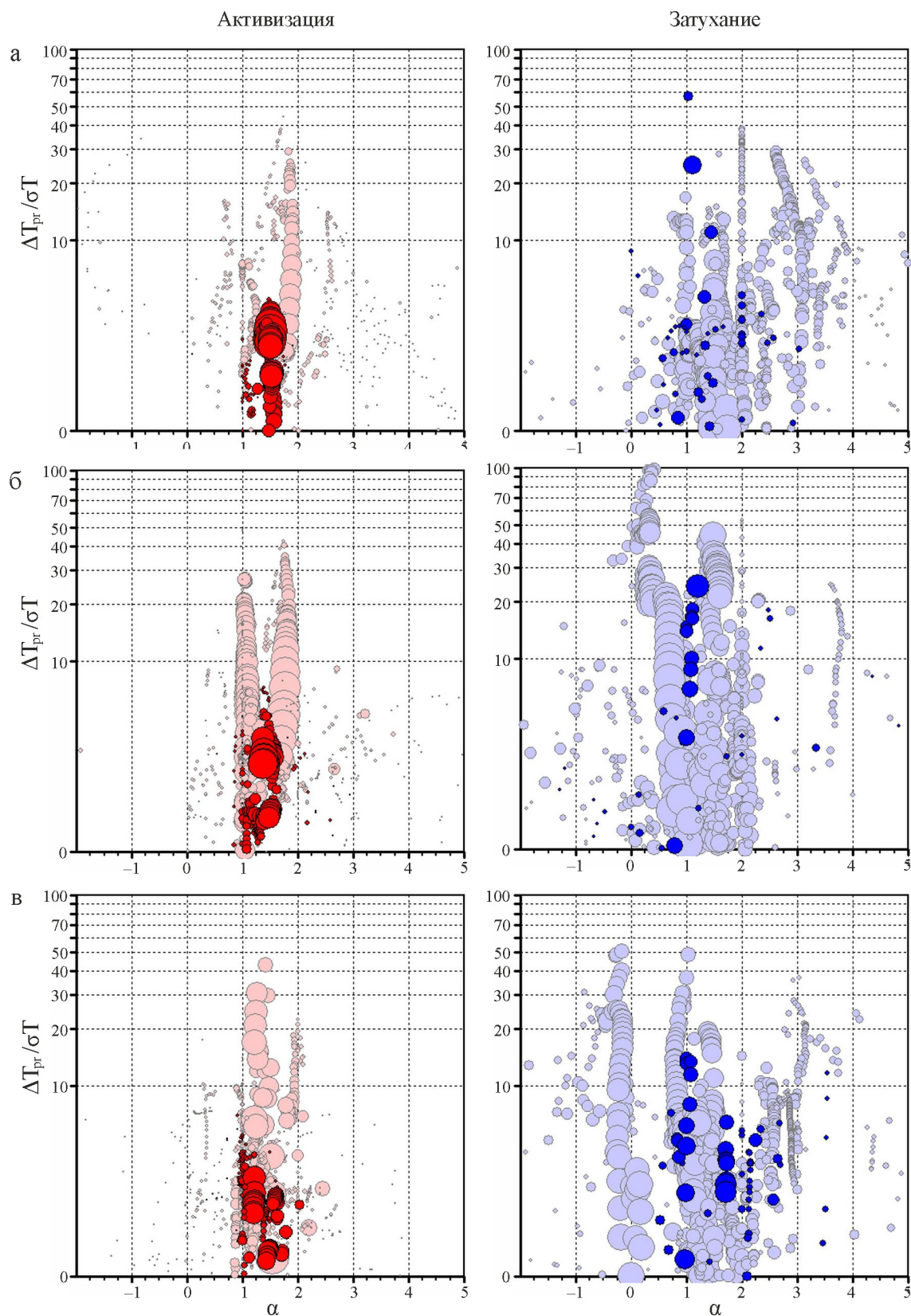


Рис. 3. Прогнозная значимость показателя степени α .

Параметры: а – N (суммарное количество зарегистрированных сейсмических событий, б – D (накопленные условные деформации), в – E (суммарная энергия землетрясений). $\Delta T_{пр}$ – прогнозная дистанция по времени, σT – ошибка прогноза. Радиус кружков определяется коэффициентом нелинейности процесса. Более темные кружки – ретропрогнозные оценки по последовательностям П.И. Токарева (1957–1961 гг.), более светлые – все ретропрогнозные оценки за период 1955–1970 гг.

рактеристика, естественным образом отражающая развитие процесса; k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность развития процесса соответственно в окрестностях стационарного состояния $((dx/dt) \approx (dx/dt)_0)$ и на значительном от него удалении $((dx/dt) \gg (dx/dt)_0)$.

На базе этого уравнения автором разработана [6, 7] методика математического моделирования и оценки прогнозируемости сейсмического сопровождения извержений. В данной работе приведены результаты применения этой методики к последовательностям П.И. Токарева 1957–1961 гг. (рис. 1–3, табл. 1, 2). В качестве исходных данных взят составленный П.И. Токаревым [11] каталог вулканических землетрясений. В рамках анализа выявлено 36 последовательностей (см. табл. 1) с различной степенью упорядоченности. В них выполнена серия прогнозных определений (см. рис. 1, 2, табл. 2). Как можно видеть, процесс в большинстве случаев (75–83%) поддается прогнозированию. При этом средняя прогнозная дистанция во времени составляет 3–4 дня, максимальная – 3–4 недели.

Ранее было показано, что зависимость П.И. Токарева (как и все простые гиперболические зависимости) соответствует решениям уравнения (1) при $(dx/dt)_0 = 0$ и $\alpha = 1.5$. Картина реальных закономерностей сложнее. Как видно из табл. 1, показатель степени α в некоторых случаях очень близок 1.5 (см., например, последовательности 2 или 9), однако в общем случае он меняется в довольно широком диапазоне. Аналогичный результат показывает и анализ статистики прогнозных определений (рис. 3): прогнозная значимость показателя степени α выше для значений, близких к 1.5 (особенно для прогнозов активизации по параметру N (см. рис. 3а), выполненных для последовательностей П.И. Токарева в 1957–1961 гг.), и в то же время присутствует довольно существенный разброс прогнозной значимости по значениям α . Это не позволяет фиксировать показатель α конкретным значением.

Тем не менее полученные результаты показывают (см. табл. 2), что сейсмическая активность поддается прогнозированию, и это может использоваться в практике прогноза. Полученные результаты становятся особенно актуальны, если учесть, что в последние годы регистрируемость вулканических землетрясений возросла, а влк. Безымянный находится в режиме, позволяющем успешно использовать разработанную методику для прогноза импульсов его активности по сейсмическим данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке по Программе № 4 фундаментальных исследований Президиума РАН “Природная среда России: Адаптационные процессы в условиях изменяюще-

Таблица 2. Ретроспективная прогнозируемость сейсмического сопровождения извержений влк. Безымянного в 1958–1961 гг. (последовательности П.И. Токарева)

Параметр	n_{pr}	$n_{pr}/n, \%$	L_{max}	L_{pr}	$\Delta t_{max}, \text{сут}$	$\Delta t_{pr}, \text{сут}$
N	317	82.98	408.3	41.78	21.04	4.024
D	294	77.57	97.50	17.58	21.04	3.528
E	277	75.89	147.6	15.80	28.64	4.818

Примечание. n_{pr} – число значимых прогнозов (прогнозная дистанция более чем в 3 раза превышает ошибку прогноза), n – общее число прогнозных определений, L_{max} – максимальный уровень прогнозируемости, L_{pr} – средний уровень прогнозируемости, Δt_{pr} – максимальная дистанция прогноза по времени, Δt_{pr} – средневзвешенная дистанция прогноза по времени (в качестве веса используется уровень прогнозируемости каждого из прогнозных определений).

гося климата и развития атомной энергетики” (проект № 12-П-5-1010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенъофф Г. Накопление и высвобождение деформации по наблюдениям сильных землетрясений // Слабые землетрясения. М.: Иностран. л-ра, 1962. С. 199–210.
2. Иванов В.В. Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956–2012 гг.) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2 (22). С. 98–119.
3. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61–72.
4. Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
5. Малышев А.И. Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 111 с.
6. Малышев А.И. Оценка прогнозируемости вулкано-сейсмических последовательностей на примере извержения вулкана Шивелуч в 1964 г. // Ежегодник-2011. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 159. 2012. С. 240–246.
7. Малышев А.И. Базовый метод прогноза вулканической активности // Ежегодник-2012. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160. 2013. С. 338–343.
8. Мархинин Е.К., Башарина Л.А., Борисов О.Г. и др. Изучение состояния вулканов Ключевской группы и вулкана Шивелуч в 1958–1959 гг. // Бюл. вулканол. ст. 1961. № 31. С. 3–16.
9. Сеньюков С.Л., Дроздина С.Я., Кожеевникова Т.Ю. и др. Прогноз извержения вулкана Безымянный 8 марта 2012 года по сейсмическим данным // Вулканизм и связанные с ним процессы: мат-лы регион. конф. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 22.
10. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). М.: Наука, 1966. 118 с.
11. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
12. Токарев П.И., Борисова В.Н. Извержение вулкана Безымянного в апреле 1960 г. // Бюл. вулканол. ст. 1961. № 31. С. 23–27.