

УДК. 551.24+528.2/3

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ВДОЛЬ ПРОТЯЖЕННЫХ НИВЕЛИРНЫХ ТРАСС В ЮЖНОЙ ЗОНЕ
ТОЛБАЧИНСКИХ ШЛАКОВЫХ КОНУСОВ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ
БТТИ 1975-1976 гг. И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ (КАМЧАТКА)

М.А. Магуськин, В.М. Магуськин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-
Камчатский, 683006; e-mail: magma@kscnet.ru*

Приводятся непосредственно измеренные в 1976–2011 гг. нивелированием II класса точности превышения между долговременными реперами, заложенными на Толбачинском геодинамическом полигоне. Эти первичные данные очень важны для будущих исследователей, так как между сохранившимися реперами можно повторить измерения любыми точными методами и сравнить их с результатами прошлых лет. Показано, что наибольшее проседание земной поверхности наблюдается у подножья конуса II, то есть в центре извержения Северного прорыва БТТИ и за 35 лет величина его достигла 2,33 м. Проседание практически затухает на удалении 7 км. Допустив симметричность распространения проседаний, определен примерный объем его равный 0,12 км³. Для сравнения – объем всех трех конусов равен 0,254 км³. Приводятся данные, показывающие поднятие земной поверхности на 4–5 см. на большой площади в юго-восточном секторе от конуса VIII после окончания извержения на Южном прорыве. Предполагается, что этот подъем произошел по причине пластовых внедрений магмы на глубинах 0–5 км по многочисленным юго-восточным направлениям без образования выхода на поверхность.

Результаты исследования и их обсуждение

Повторные нивелирования вдоль протяженных трасс (рис. 1, табл. 1, 2), выполненные Производственным объединением «Дальаэрогеодезия» Федеральной службы геодезии и картографии в 1976, 1977, 1985 гг., с целью получения сведений о вертикальных деформациях земной поверхности в связи с происшедшим в 1975–1976 гг. Большим трещинным Толбачинским извержением (БТТИ 1975–1976 гг.), а также результаты повторных линейно-угловых измерений 1985 г. на обширной площади Толбачинского геодинамического полигона, до сих пор не были представлены научной общественности в виде открытой публикации. На наш взгляд, наиболее значимый и важный результат получен по данным повторных нивелирований. Следует заметить, что непосредственно в окрестностях Северного прорыва БТТИ нивелирование выполнялось Институтом вулканологии ДВО РАН (ныне Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН) многократным повторением по разным направлениям различной протяженности, как в ходе извержения, так и после окончания его. Результаты этих работ рассмотрены в работах [1, 7, 8]. Значения измеренных Институтом вулканологии превышений в 1976 г. приведены в табл. 1 на участке от репера рп. 26 до рп. 310; в табл. 2 на участке от рп. 20 до рп. 1405. В обеих таблицах данные за 1976 г. взяты из самых последних измерений, выполненных в том же году (хотя извержение на Южном прорыве БТТИ еще не закончилось). Более детально места расположения реперов вблизи Северного прорыва БТТИ показаны на рис. 2.

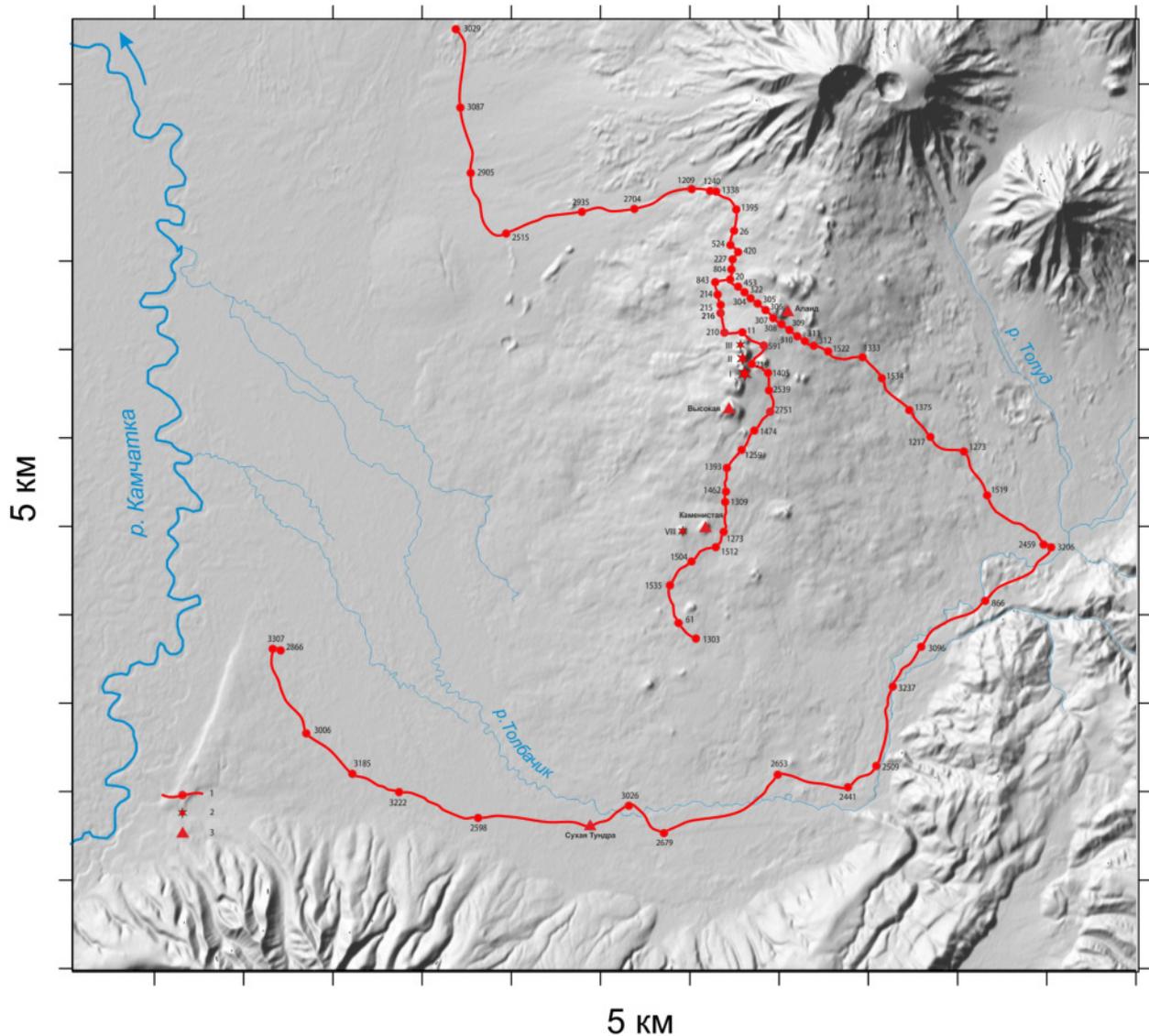


Рис.1. Схема местоположений реперов высокоточного нивелирования на Толбачинском геодинамическом полигоне. 1 – нивелирные ходы; 2 – новообразовавшиеся шлаковые конусы; 3 – пункты триангуляции.

Во все года превышения определены нивелированием II класса с погрешностью $\pm 1 \text{ мм} \times \sqrt{L}$, где L – расстояние между реперами в километрах. Используя превышения между реперами, определенные в 1976, 1977, 1985 гг. по всей трассе нивелирования (110 км) от рп. 3029 до рп. 2866, построены графики изменения уровня земной поверхности относительно уровня его в 1976 г. (рис. 3). На участке от рп. 26 до рп. 310 этой же трассы нивелирование выполнялось более часто, т.е. имеются результаты за 1978 и 1989 годы. Это позволило построить более детальные графики относительных изменений уровня земной поверхности на этом участке (рис. 4). Аналогичные построения графиков выполнены по трассе меридионального направления от рп. 20 до рп. 2679, однако здесь первое нивелирование по всей трассе было

Таблица 1. Превышения, измеренные на Толбачинском полигоне нивелированием II класса в 1976-1989 гг. на разных участках по ходу от рп. 3029 до рп. 2866.

№№ реперов	Расстояние в км	Года и превышения в м:				
		1976	1977	1978	1985	1989
1	2	3	4	5	6	7
3029						
	4,6	-39,49	-39,5		-39,49	
3087						
	3,7	13,16	13,16		13,17	
2905						
	4,1	46,62	46,63		46,62	
2515						
	4,4	139	138,99		138,98	
2935						
	2,8	155,15	155,15		155,14	
2704						
	3,4	233,45	233,46		233,45	
1209						
	0,9	115,95	115,95		115,94	
1240						
	0,2	29,13	29,13		29,12	
1338						
	1,4	82,39	82,39		82,39	
1395						
	1,2	-10,29	-10,29		-10,3	
26						
	0,3	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	
524						8,59
	04	24,28	24,28	24,28	24,28	
420						
	0,5	-6,41	-6,42	-6,42	-6,42	-6,42
227						
	0,7	9,32	9,32	9,32	9,31	9,3
804						
	0,5	18,43	18,43	18,43	18,42	18,42
20						
	0,4	-0,05	-0,06	-0,06	-0,08	-0,08
453						
	0,4	10,86	10,85	10,85	10,83	10,82
322						
	0,3	15,4	15,4	15,4	15,4	15,41
304						
	0,3	11,85	11,85	11,85	11,85	11,85
305						
	0,3	5,05	5,05	5,05	5,07	5,07
306						
	0,6	24,77	24,76	24,76	24,74	24,74
307						
	0,3	14,23	14,22	14,22	14,21	14,21
308						
	0,4	19,33	19,33	19,32	19,3	19,29

Таблица 1. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7
309						
	0,4	44,31	44,32	44,33	44,36	44,37
310						
	0,6	3,82	3,81		3,82	
311						
	0,6	-32,17	-32,15		-32,12	
312						
	0,2	-88,13	-88,13		-88,12	
1379						
	0,6	-66,41	-66,41		-66,41	
1522						
	2,2	-136,75	-136,76		-136,72	
1333						
	1,6	-104,26	-104,26		-104,26	
1534						
	2,3	-69,61	-69,61		-69,59	
1375						
	1,8	-129,34	-129,33		-129,33	
1217						
	2,3	-62,13	-62,13		-62,13	
1273						
	3	-55,41	-55,41		-55,4	
1519						
	4,7	-28,08	-28,09		-28,07	
2459						
	0,2	-0,53	-0,53		-0,53	
3206						
	0,2	-0,29	-0,29		-0,29	
476						
	4,6	-12,96	-12,96		-12,96	
866						
	4,1	-59,06	-59,08		-59,06	
3096						
	2,8	-31,61	-31,62		-31,61	
3237						
	4,7	-27,69	-27,69		-27,69	
2509						
	2,1	-15,73	-15,73		-15,73	
2441						
	4,1	-28,51	-28,51		-28,52	
2653						
	7,4	-21,54	-21,54		-21,55	
2679						
	2,5	-15,53	-15,53		-15,53	
3026						
	2,5	-9,95	-9,95		-9,95	
Сух. Тундра						
	6,3	-5,14	-5,14		-5,14	

Таблица 1. Окончание

1	2	3	4	5	6	7
2598						
	4,8	0,55	0,55			
3222					5,91	
	2,8	5,36	5,36			
3185						
	3,6	-7,99	-8		-8,01	
3006						
	5,1	-1,41	-1,4		-1,4	
3307						
	0,2	4,56	4,56		4,56	
2866						
	$\Sigma = 110,4$ км					

Примечание: В измеренные превышения не введены поправки за переход к нормальным высотам.

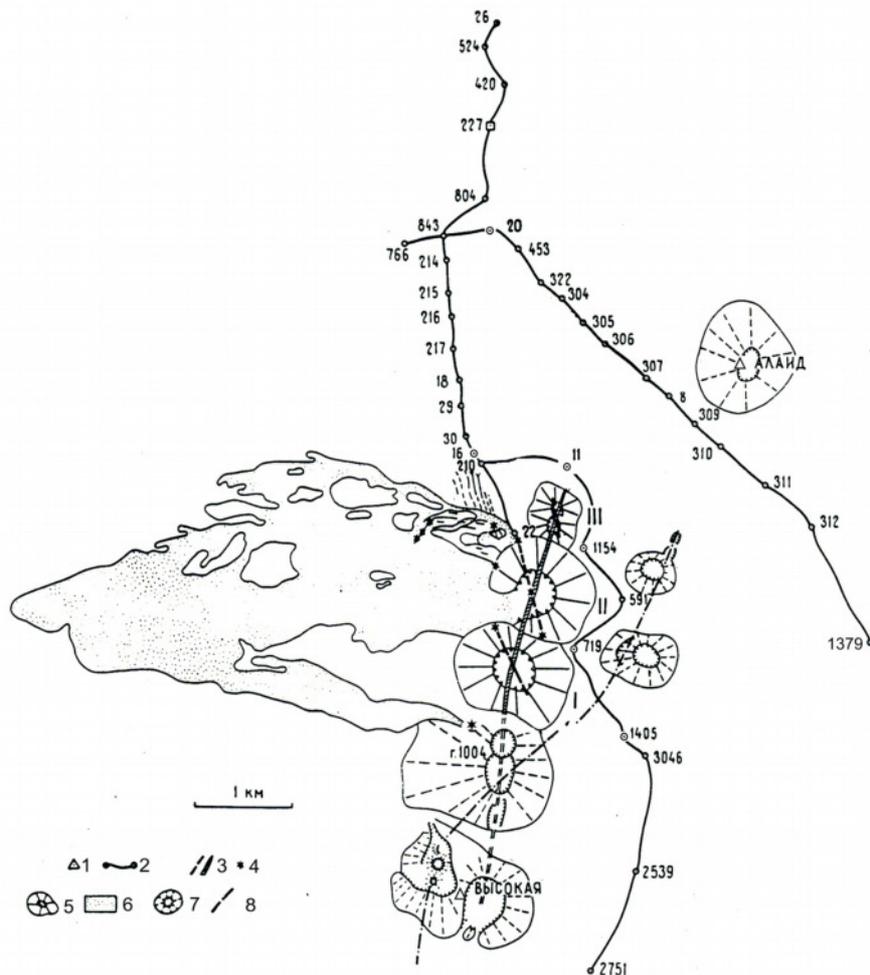


Рис.2. Схема расположения нивелирных ходов и реперов вблизи Северных конусов БТТИ. 3- трещины, образовавшиеся во время извержения (а-эруптивные трещины, б-вероятное положение глубокой питающей дайки; 4 - истоки лавовых потоков; 5 - старые шлаковые конусы; 6 - лавовые потоки; 7 - новообразовавшиеся шлаковые конусы; 8 - старая трещина растяжения. Остальные обозначения те же, что на рис.1.

Таблица 2. Превышения, измеренные на Толбачинском полигоне нивелированием II класса в 1976-2011 гг. на разных участках по ходу от рп. 20 до рп. 2679.

№№ реперов	Расстояние в км	Года и превышения в метрах					
		1976	1977	1978	1985	1989	2011
1	2	3	4	5	6	7	8
20							
	0,5	-50,43	-50,43	-50,43	-50,43	-50,43	
843							
	0,2	-16,99	-16,99	-16,99		-17	
214					-19,92		
	0,4	-2,9	-2,9	-2,91		-2,93	
215							
	0,2	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,03	
216							
	0,3	-16,29	-16,31	-16,31		-16,35	
217							
	0,3	10,42	10,4	10,38		10,32	
18							
	0,3	16,89	16,88	16,87		16,83	
29					111,6		
	0,4	3,69	3,68	3,67		3,62	
30							
	0,2	15,48	15,47	15,46		15,41	
16							
	0,1	13,33	13,33	13,33		13,3	13,3
210							
	0,9	68,35	68,36	68,38		68,43	68,49
11							
	1,3	-26,05	-26,26	-26,38		-26,8	-27
1154					-22,2		
	0,8	4,51	4,55	4,55		4,5	
591							1,54
	0,6	-2,23	-2,37	-2,44		-2,75	
719					-24,79		
	1	-23,11	-22,84	-22,67			-21,55
1405							
	0,2		-13,35	-13,33	-13,24		-13,16
3046							
	0,7		-47,45		-47,34		
2539							
	0,6		-82,73		-82,7		
2751							
	2,1		-130,49		-130,47		
1474							
	1,5		-77,14		-77,16		
1259							
	1,5		-90,63		-90,65		
1393							
	1,7		-103,32		-103,29		
1462							
	0,8		9,5		9,54		
1309							

Таблица 2. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
	2,3		-43,7		-43,69		
1273							
	1		-21,67		-21,67		
1512							
	1,8						
1504			-102,33		-102,32		
	2,2						
1535							
	2,1		-16,47		-16,47		
61							
	1,4		5,56		5,56		
1303							
	1,8		-12,56				
62							
	1,6		-16,1				
63							
	1,2		-22,46				
64							
	1,8		-30,14				
65							
	1,9		-19,36				
4613							
	1,9		7,14				
3144							
	3,9		-6,53				
2679							
	$\Sigma = 41,5$ км						
Дополнительно:							
11							
	0,5					1,05	1,01
1030					-22,2		
	1	-26,03	-26,26	-26,38			1,11
591						-27,84	
	0,8						-29,12
1154							
210							
	0,8	13,75	13,56	13,45		13,08	
22							
1405							
	1,2	-3,98	-4,14				
2570				-90,22			-90,52
	0,9	-86,13	-86,04				
2448							
766							
	0,4	43,22	43,22	43,22		43,22	
843							

Таблица 2. Окончание

26							
	2,4	29,93	29,92	29,92	29,9	29,89	
20							
804							
	0,6	-32	-32,01	-32,01	-32,01	-32,01	
843							
26							
	5,3	2,11	2,02	1,96		1,64	
210							

Примечание: В измеренные превышения не введены поправки за переход к нормальным высотам.

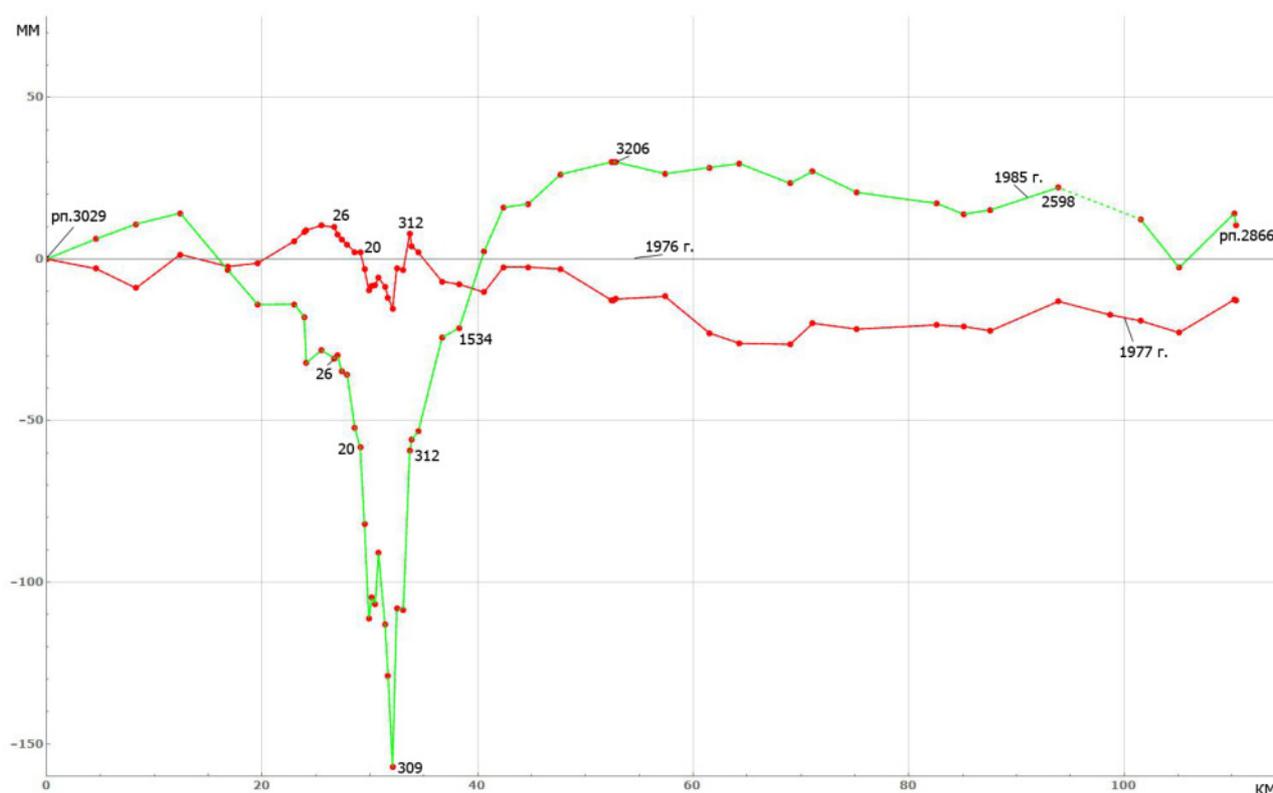


Рис.3. Относительные изменения уровня земной поверхности вдоль протяженной линии нивелирования от рп. 3029 до рп. 2866 (рис.1).

выполнено в 1977 г., а повторное – в 1985 г. и только до рп. 1303, поэтому график относительного изменения уровня земной поверхности в период 1977-1985 гг. обрывается на рп.1303 (рис. 5). По имеющимся дополнительным данным на участке от рп. 20 до рп. 1405 построен сравнительно детальный график относительных изменений (рис. 6). Повторное нивелирование на этом участке, выполненное в 2011г., показало уменьшение отметок реперов за период 1976-2011 гг. относительно рп. 20: рп.16 на 746 мм; рп. 210 на 783 мм; рп. 11 на 640 мм; рп. 1154 на 1595 мм; рп. 719 на 2335 мм; рп. 1405 на 773 мм.

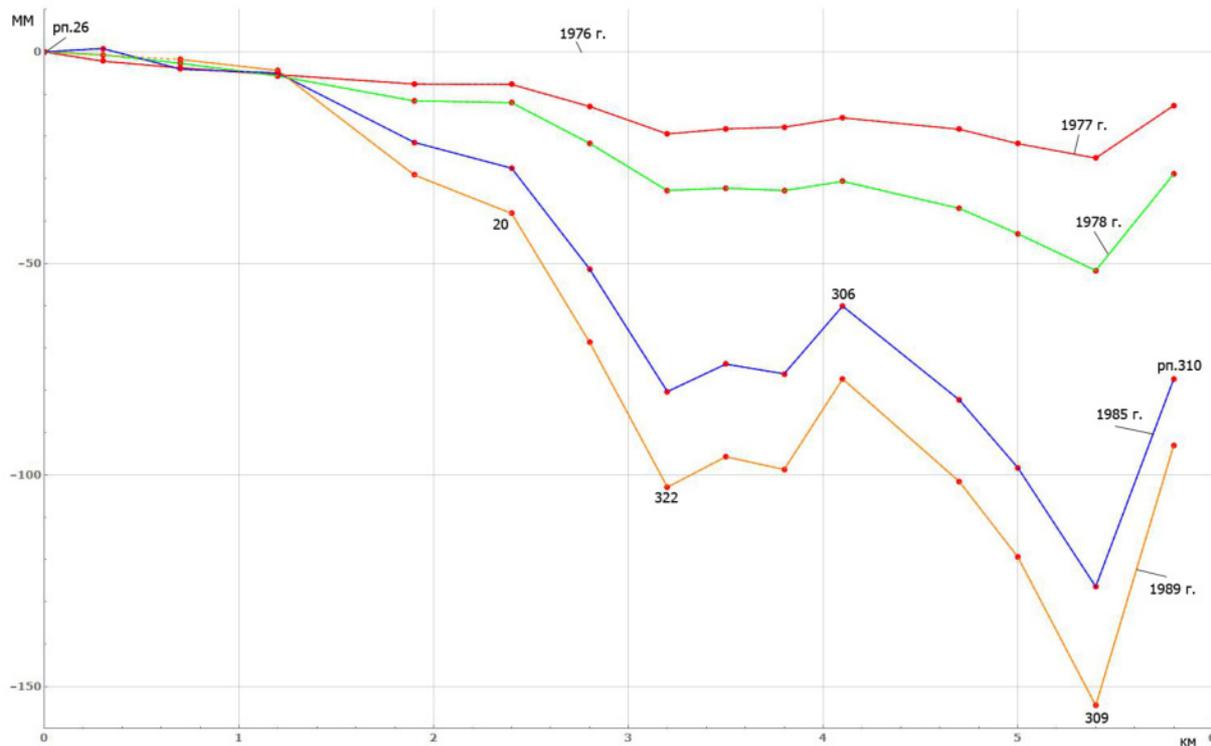


Рис.4. Детализирующий более наглядно относительные изменения уровня земной поверхности вдоль линии нивелирования от рп.26 до рп.310 (рис.2) по данным всех имеющихся измерений в период 09.1976-1989 гг.

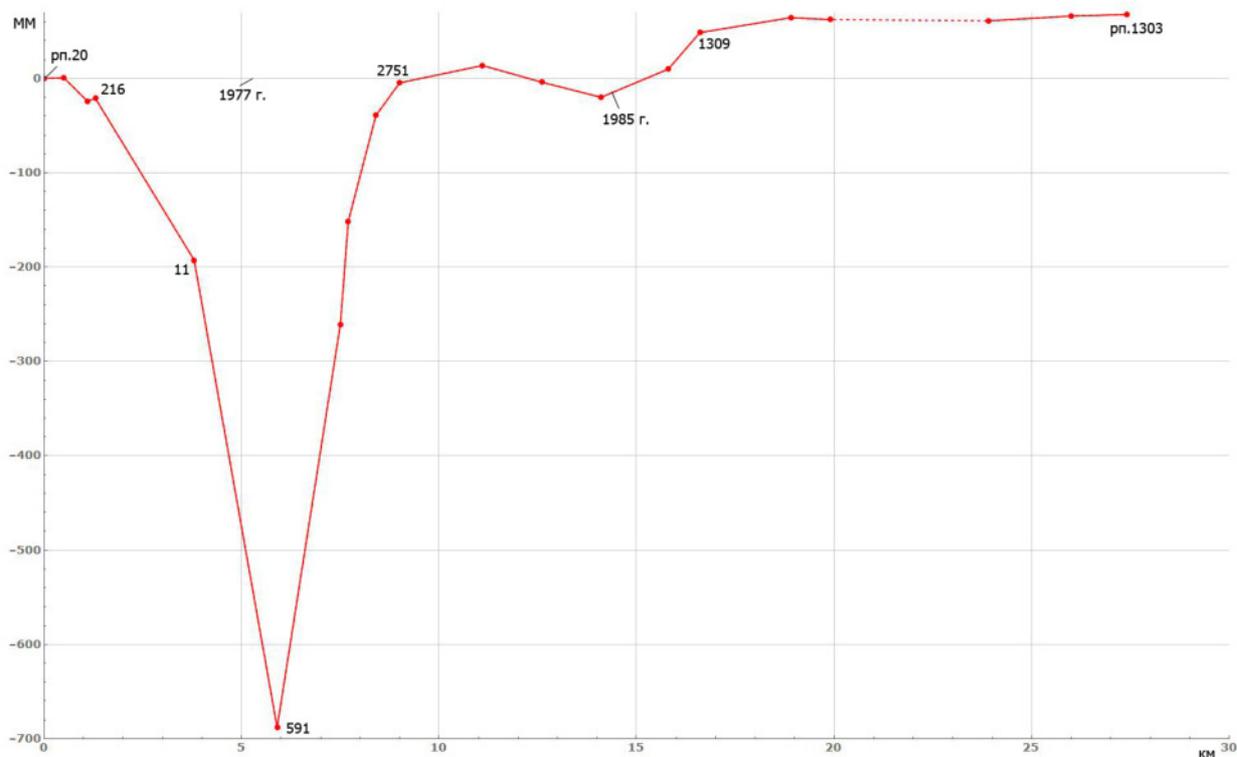


Рис.5. Относительные изменения уровня земной поверхности вдоль протяженной линии меридионального направления от рп. 20 до рп. 1303 (рис.1).

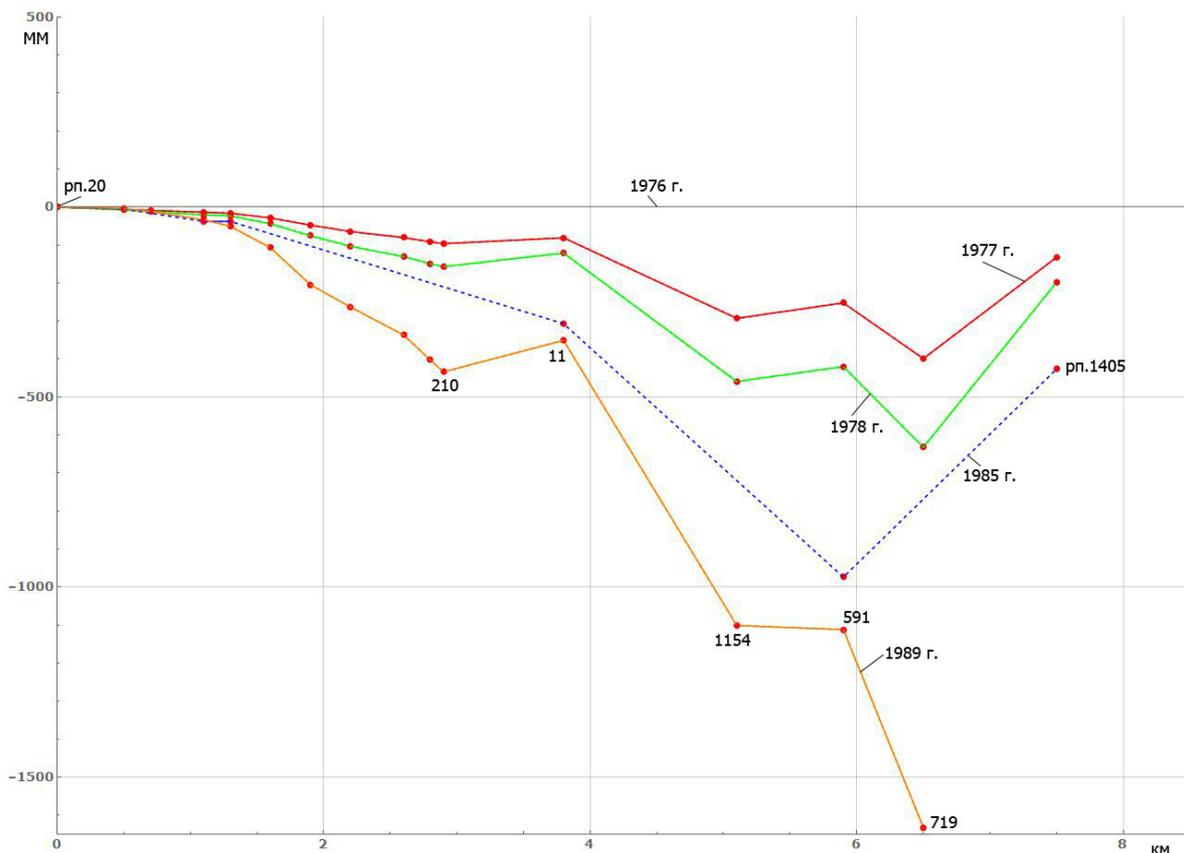


Рис.6. Детализирующий более наглядно относительные изменения уровня земной поверхности вдоль линии нивелирования от рп. 20 до рп. 1405 (рис.2), проходящей вблизи шлаковых конусов Северного прорыва БТТИ.

Относительные опускания реперов на участке рп. 26 – рп. 20 в период 1976-1977 гг. (рис. 3) возрастают по мере приближения к центру БТТИ (радиальное направление) и особенно наглядно это видно на рис. 6, где движения реперов рассмотрены относительно рп. 20. Вектор наклона, построенный на репере 843 по нивелирным данным за тот же период направлен на центр конуса II и равен 43 мкрад. Опускания реперов происходит в основном из-за прогибания и уплотнения старых лавовых покровов за счет массы образовавшихся шлаковых конусов объемом $0,254 \text{ км}^3$, которая при средней плотности их пород ($1,5 \text{ г/см}^3$) равна $0,38 \times 10^9$ тонн [1]. Если под действием веса изверженного материала происходит упругий изгиб земной поверхности, то он, по-видимому, аналогичен прогибу дна водохранилищ под действием водной нагрузки. Данных нивелирований по дну водохранилищ до и после заполнения их много. Даже для водохранилищ объемом более 10 км^3 величина наибольшего прогиба составляет 2-3 дециметра [2, 3]. Вокруг крупного инженерного сооружения в 5–7 лет после начала эксплуатации также образуется воронка проседания грунта, в дальнейшем, как правило, локальные вертикальные подвижки полностью затухают. Близкое к этому наблюдается вокруг конусов Северного прорыва. Если предположить, что проседание происходит

симметрично относительно центра конуса II и оно затухает на удалении примерно 7 км, то объем проседания земной поверхности вокруг Северного прорыва достиг к 2012 году $0,12 \text{ км}^3$. Для сравнения – суммарный объем трех конусов Северного прорыва равен $0,25 \text{ км}^3$.

По почти перпендикулярному направлению от рп. 20 до рп. 312 в период 1976–1977 гг. опускание сменяется подъемом на участке трассы длиной 4,6 км, значимое опускание произошло в довольно узкой зоне шириной 2,2 км (рис. 3). Этот факт показывает происшедшее в этот период опускание земной поверхности на продолжении старой трещины растяжения, показанной значком 8 на рис.2, которая является осью зоны шлаковых конусов. К 1985 году ширина этой зоны опускания достигла 12 км (рис. 3). На этом участке наблюдается ступенчатость вертикальных подвижек с сохранением отрицательных значений (рис. 4), скорее всего, это признак наличия круто падающих трещин растяжения, параллельных главному разлому. На продолжение этой зоны в юго-западном направлении расположены все три новых шлаковых конуса, следовательно, опускания земной поверхности вокруг этих конусовотягощены вертикальными движениями в широкой разломной зоне, не связанных с нагрузкой на поверхность массой конусов. Относительное опускание реперов, начиная с рп. 3026, далее по всей трассе на 2,5–3,0 см за период 1976–1977 гг. (рис. 3), по-видимому, связано с излиянием лавовых потоков объемом $0,968 \text{ км}^3$ и образованием шлакового конуса объемом $0,012 \text{ км}^3$ [1] во время деятельности Южного прорыва БТТИ. По данным измерений 1985г. произошел подъем этой же части земной поверхности относительно уровня в 1977 г. на 5–6 см. К сожалению, время смены знака вертикальных движений нам не известно. Возможно, воздымание началось после окончания извержения на Южном прорыве в декабре 1976 г. и сопровождалось поверхностными землетрясениями в этом районе, эпицентры которых смещались постепенно в юго-восточном направлении [1]. Миграция этих землетрясений, гипоцентры которых находились на глубинах 0–5 км [1], возможно связаны с продвижением магмы в ослабленной разломной зоне, которая не смогла прорваться на поверхность в окраинной южной зоне шлаковых конусов Толбачинского дола (в этой зоне действительно имеются старые шлаковые конуса). Внедрение магмы в приповерхностные слои земной коры на таких глубинах мог вызвать незначительный подъем земной поверхности, что отразилось на данных повторных нивелирований в 1985 г.

На протяженной нивелирной трассе от рп. 20 до рп. 2679 (рис.1), кроме больших величин относительных опусканий вблизи конусов I, II, III, наблюдается значимый подъем в пределах 4–6 см на участке от рп. 1309 до рп. 1303 и, вероятно, далее до рп. 2679. Эти величины не противоречат результатам нивелирования по трассе 3029–2866 на участке от рп. 1217 до рп. 2866 и подтверждают предположение, что положительные вертикальные деформации возникли из-за внедрения магмы в приповерхностные слои в южном направлении от конуса VIII.

Рассмотренные выше вертикальные деформации земной поверхности определены высокоточным геометрическим нивелированием с погрешностью определения превышения $\pm 1 \text{ мм}$ на один километр расстояния. По мере удаления от исходного репера, принятого за неподвижный, ошибка определения отметок реперов растет, а ошибка разности их между года-

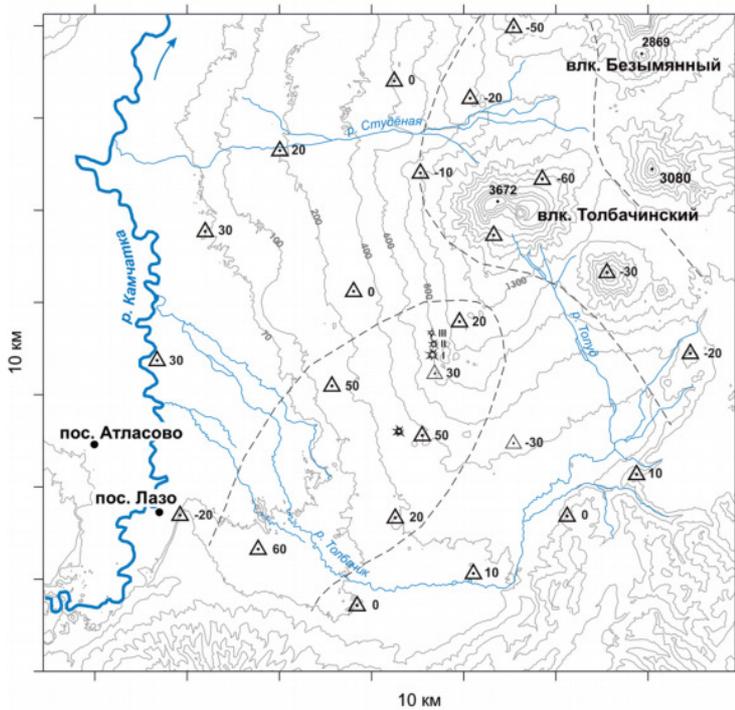
ми (эпохами) определения больше в 1,4 раза. С учетом этих факторов средне квадратическая погрешность определения отметки рп. 2866, удаленного на 110 км от исходного рп. 3029, составляет ± 15 мм. Как правило, во внимание принимаются результаты, погрешность определения которых не превышает двойную средне квадратическую погрешность, в данном случае это ± 30 мм. Из рис.3 видно, что разности отметок реперов, расположенных в конце трассы, укладываются в диапазон возможных погрешностей, вычисленных с учетом удаленности каждого репера от исходного.

Результаты определения вертикальных смещений пунктов по данным тригонометрического нивелирования (с использованием углов наклона и расстояний) по сторонам линейно-угловой триангуляции, созданной на сравнительно большой площади, весьма неоднозначны [4, 5, 6, 9]. Различны и точки зрения у авторов об их погрешностях. Наш опыт определения превышений таким способом на сторонах 1-3 км показывает погрешность в пределах $\pm 2-5$ см. Примерно такая же погрешность ± 3 см на 1 км длины линии приводится в работе [6]. Погрешность определения превышения зависит от длины линии и равна $3 \text{ см} \times \sqrt{L}$, где L – длина стороны треугольника в км. Длины сторон линейно-угловой триангуляции на Толбачинском полигоне изменяются в пределах 6,3-22,9 км, следовательно и погрешности определения превышений вдоль этих сторон колеблются в пределах $\pm 8-14$ см, а разности в пределах $\pm 11-20$ см. Следует заметить, что погрешность тригонометрического нивелирования на 1 км длины, определенная по невязкам в треугольниках в этой же сети, показывает величину более ± 6 см. В целом тригонометрическое нивелирование по стандартной методике по сторонам триангуляций может уверенно выявить вертикальные подвижки, превышающие 30 см. Из-за больших погрешностей тригонометрического нивелирования трактовка результатов их у разных авторов различна. Мы считаем наиболее обоснованным показ вероятных областей воздымания и опускания земной поверхности в связи с БТТИ и обрушениями в кратере вулкана Плоский Толбачик в период в 1975-1976гг. без обозначения четких границ (рис. 7).

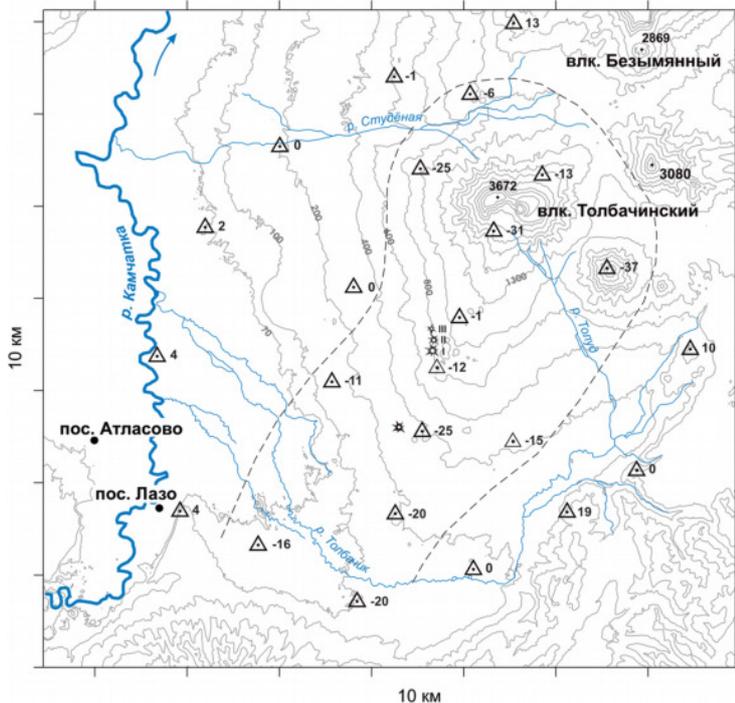
Выводы

1. Отсутствие непрерывных наблюдений за деформациями земной поверхности на Толбачинском геодинамическом полигоне не позволяет точно определить время начала или окончания таких явлений, как сравнительно малые подвижки земной поверхности, связанных с извержениями на этой территории.
2. На основании дискретных геодезических наблюдений есть основания констатировать, что извержение конуса I (Северный прорыв БТТИ) сопровождалось в первые дни воздыманием земной поверхности на значительной площади (рис.7). «Остатки» этого
3. воздымания еще сохранились в 1976 году, хотя в окрестностях конусов I, II, III про
4. должалось локальное опускание из-за возникшей нагрузки на старые лавовые потоки массы шлаковых конусов.

1971 - 1976



1976 - 1977



5. В том же 1976 г. обнаружена обширная область опускания земной поверхности в окрестностях вулкана Плоский Толбачик (рис. 7). Оно, безусловно связано с БТТИ и, по-видимому, это явление стало возможным в связи с началом излияния магмы на поверхность.
6. По геодезическим измерениям 1977 г. выявлена область опускания (рис. 3, 7), вызванная либо возвратным движением из-за отсутствия давления снизу, либо следствием оттока магмы в южном направлении (в сторону понижения рельефа).
7. Подъем земной поверхности, обнаруженный в 1985 г. по данным нивелирований вдоль протяженных трасс, вероятнее всего был вызван внедрением магмы в приповерхностные слои земной коры в южном направлении от конуса VIII.

Рис. 7. Вертикальные относительные подвижки пунктов триангуляции (в см), вероятно происшедшие перед Северным прорывом БТТИ или в ходе извержения и обрушения в кальдере вулкана Плоский Толбачик в 1975 г., а также после окончания извержения в период 1976-1977 гг. (измерения в 1976 г. были выполнены в июле-августе, а извержение на Южном про-рыве завершилось 10 декабря того же года). Пунктиром оконтурены примерно области воздымания и опускания земной поверхности. В качестве условно неподвижных приняты пункты с показанием отсутствия движений («0»).

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975-1976 гг., Камчатка) / Под ред. Федотова С.А. М.: Наука, 1984. С. 472-513.
2. *Гунта Х, Растоги Б.* Плотины и землетрясения (перевод с английского под ред. Золотарева Г.С.). М.: Мир, 1979. 251 с.
3. *Карлсон А.А.* Измерение деформаций гидротехнических сооружений. М.: Недра, 1984. 244 с.
4. *Кафтан В.И.* Анализ тригонометрического нивелирования в районе вулкана Толбачик // Геодезия и картография. 1991. № 1. С. 32-35.
5. *Кириенко А.П., Шульман В.А., Никитенко Ю.П.* Анализ методов и результатов геодезических работ на Толбачинском геодинамическом полигоне в 1971-1976 гг. // В кн.: Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975-1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 200-212.
6. *Кириенко А.П.* Результаты определения горизонтальных деформаций земной поверхности в районе Большого трещинного Толбачинского извержения по материалам угловых и линейных измерений 1971, 1976 и 1977 гг. // Бюллетень вулканологических станций. 1979. № 56. С. 63-66.
7. *Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф.* Деформации земной поверхности в районе Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. в период 1978-2000 гг. и их возможные причины. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 55-61.
8. *Магуськин М.А., Титков Н.Н., Демянчук Ю.В.* О деформациях земной поверхности в районе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. на Камчатке в период 2000-2011 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Выпуск 21. С. 147-151.
9. *Шульман В.А., Шароглазова Г.А.* Горизонтальные и вертикальные деформации земной поверхности в районе Большого трещинного Толбачинского извержения по данным геодезических измерений 1971, 1976 и 1977 гг. // Вулканология и сейсмология. 1980. № 3. С. 72-86.