

## ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ В 1978–2014 гг. ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ (КАМЧАТКА)

© 2019 г. М. А. Магуськин\*, Н. А. Жаринов\*\*, Ю. В. Демянчук

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9*

*\*e-mail: magma@kscnet.ru,*

*\*\*e-mail: nzhar@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

Приводятся измеренные величины — наклонные дальности и превышения между геодезическими знаками на северо-восточном склоне вулкана Ключевской за 1978–2014 гг. Как правило, перед побочными и вершинными извержениями наблюдался подъем, а окончание извержений сопровождалось опусканием склона вулкана. По данным наиболее продолжительного ряда наблюдений вертикальных смещений с 1979 по 2014 гг. на радиальном профиле “Киргурич” определен подъем склона вулкана возрастающий по мере приближения к его кратеру. Максимальные смещения происходили за два года до начала побочного прорыва “Предсказанный” в 1983 г., и перед вершинными извержениями 2003–2004 гг. и 2007 г. Наклон земной поверхности величиной 12.5 микрорадиан на базе 17.8 км была зафиксирована в 2007 г. При удалении от кратера вулкана на 27 км вертикальные смещения становятся незначительными. Показано, что пункты, расположенные на высотах от 2.0 тыс. м до 3.0 тыс. м, подвержены глубинной ползучести, т.е. сползанию. Скорости смещений таких пунктов достигали 5–20 см/год. Значимые горизонтальные смещения геодезических пунктов происходили вблизи побочных прорывов 6 марта 1980 г. и 8 марта 1983 г. С 1989–1993 гг. до 2014 г. наблюдались сокращения всех длин линий от 5 до 20 мм, что указывало на сжатие северо-восточного склона вулкана Ключевской.

**Ключевые слова:** превышение, наклон, линия, длина, скорость, извержение.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201953-21>

### ВВЕДЕНИЕ

Гигантский Ключевской вулкан относится к числу наиболее мощных активных базальтовых вулканов мира. Вулкан расположен в северной части Курило-Камчатской дуги и ее вулканического пояса в районе стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Это активный стратовулкан высотой 4750 м, меняющейся во время извержений, с вершинным кратером, диаметр которого около 700 м. Возраст вулкана ~ 6000 лет. Это самый высокий действующий вулкан Европы и Азии. На склонах вулкана и его подножии находятся десятки конусов и многочисленные лавовые потоки побочных извержений. Ключевской вулкан извергает в среднем 60 млн т базальтов в год, что составляет приблизительно 1/4 часть общего годового количества пород, извергаемых всеми 70 вулканами Курило-Камчатского пояса, и около половины их ювинильных продуктов [Федотов, Жаринов, 2007]. С 1935 г. сотрудниками Камчатской вулканологической станции АН СССР было выполнено множество работ, в которых изучались извер-

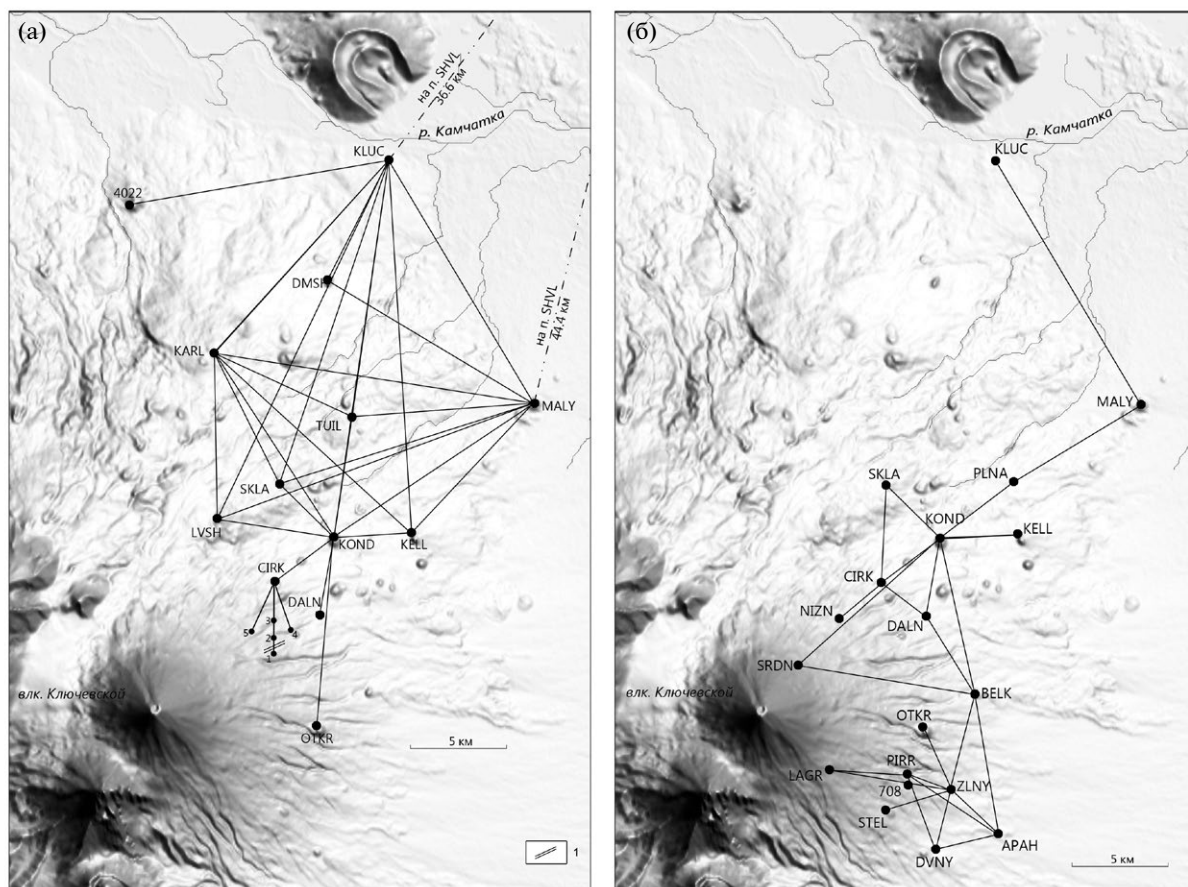
жения, их продукты, сейсмичность, глубинное строение, проводился прогноз извержений. Получены данные о 16 вершинных и 17 побочных извержениях. С 1978 г. на северо-восточном склоне вулкана выполнялись работы по созданию геодезического полигона для изучения деформаций земной поверхности. Результаты этих работ изложены в работах [Жаринов и др., 1984, 2018; Жаринов, Еремеев, 1985; Жаринов, Демянчук, 2009, 2016; Федотов, Жаринов, 2007; Федотов и др., 2010]. Во всех этих работах отсутствуют исходные данные в виде таблиц — измеренные превышения и наклонные дальности между закрепленными на земной поверхности геодезическими центрами. Данная работа, с показом таблиц измеренных величин, выполнена с целью сохранения и оценки их представительности с определенной погрешностью. Эти фактические данные, прежде всего, важны для будущих исследователей, так как между одними и теми же геодезическими пунктами можно повторить измерения через много лет и сравнить их с прежними результатами.

## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения деформаций земной поверхности в связи с активностью вулкана Ключевской в 1978 г. на его северо-восточном склоне были начаты геодезические работы по созданию Ключевского геодезического полигона (КГП) [Жаринов и др., 1984]. В последующие годы состав работ в методическом плане увеличился, была привлечена производственная организация – Предприятие № 2 ГУГК при СМ СССР (теперь ОАО “Дальаэрогеодезия”). В данной работе рассматриваются результаты, полученные Институтом вулканологии (ИВ) ДВНЦ АН СССР, который был переименован в Институт вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН в 2004 г. С 2012 г. ИВиС приступил к измерению наклонных расстояний методом GNSS (Global Navigation Satellite System) технологии [Антонович и др., 2004].

Была создана сеть для линейных засечек с удаленной базы (пункты KLUC, MALY), центральная система для частых повторных измерений с центром на конусе D (KOND), нивелирный ход вдоль р. Киргурич и деформационные нивелирные площадки для частых повторных

измерений, три наклонмерные станции для непрерывной регистрации наклонов земной поверхности. Результаты измерений на нивелирных площадках, а также наблюдений наклонов земной поверхности на Ключевском полигоне изложены в работах [Жаринов и др., 1978, 1984; Широков и др., 2009]. На рис. 1а показана схема измерений длин линий светодальномерами СГ-3 и Геодиметр-8 вблизи вулкана Ключевской в 1978–1984 гг. Большинство этих измерений, в том числе на пункты вблизи вулкана Шивелуч, удаленные на 37 и 44 км, являлись единичными, так как измерения проводились только в 1979 г. в течение нескольких дней с погрешностью  $\pm(2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D)$ , где  $D$  – расстояние в мм. Повторные измерения этих линий до настоящего времени не проводилось. Поскольку центры пунктов являются долговременными, то линии можно будет измерять повторно и сравнивать их с прошлыми, поэтому ценность этих единичных измерений очевидна. Короткие линии с пункта KOND измерялись пять раз в период 1978–1984 гг. (табл. 1). За шесть лет произошло значительное сокращение длин линий KOND-KELL, KOND-DALN,



**Рис. 1.** Схема измерения длин линий на Ключевском ГДП.

а – светодальномерами СГ-3 и Геодиметр-8 в 1978–1984 гг. (1 – трещина излияния лавы 05.03.1980 г.); б – светодальномером СГ-3 линии KLUC–MALY и светодальномером СП-2 всех остальных линий в 1988–2007 гг.

**Таблица 1.** Наклонные расстояния, приведенные к центрам знаков (Дцц) на Ключевском ГДП в период 1978–1984 гг., м

Название линий	Год производства работ					Разность (мм) в период 1978–1984 гг.
	1978	1979	1980	1983	1984	
KOND-SKLA	4003.858	4003.843	4003.856	4003.863	4003.846	-12
KOND-KELL	4426.478	4426.481	4426.47	4426.429	4426.394	-84
KOND-DALN	4232.588	4232.584	4232.577	4232.56	4232.554	-34
KOND-CIRK	3929.804	3929.792	3929.778	3929.788	3929.796	-8
KOND-KLUC	20157.388	20157.362				
KOND-LVSH		6271.182			6271.111	
KOND-TUIL			6622.176		6622.171	
KOND-KARL		11793.189			11793.173	
KOND-OTKR					10515.026	
KLUC-KELL		20055.853				
KLUC-TUIL		13535.453				
KLUC-SKLA		17848.674				
KLUC-LVSH		20968.251				
KLUC-DMSH		6968.513				
KLUC-KARL		13700.229				
KLUC-SHVL		36598.552				
KLUC-MALY		14934.442				
KLUC-4022		14346.346				
KARL-KELL		14711.231				
KARL-LVSH		8855.741				
KARL-TUIL		8043.137				
KARL-SKLA		8135.704				
MALY-KELL		9675.383				
MALY-KOND		12984.918				
MALY-LVSH		18047.763				
MALY-SKLA		14094.163				
MALY-TUIL		9887.625				
MALY-KARL		17382.252				
MALY-DMSH		12923.22				
MALY-SHVL		44435.679				
CIRK-1			4102.308			
CIRK-2			3733.847			
CIRK-3			2278.946			
CIRK-4			3675.077			
CIRK-5			3833.912			

Примечание. Измерения в период 1978–1984 гг.: 1 – пункты LVSH, KARL, TUIL, MALY, OTKR, DMSH являлись пунктами государственной триангуляции (гс. тр.). Пункт CIRK – 1-ая бетонная тумба на не самой высокой точке конуса “Цирк”. Пункты SKLA, KOND, KELL, DALN бетонные туры с принудительным центрированием. Точки CIRK-1, 2, 3, 4, 5 – латунные знаки, заложенные на скалах. Пункт KLUC – деревянный сигнал на территории вулканостанции над грунтовым центром, высота светодальномера над центром 12.65 м; 2 – расстояния, связанные с пунктами KLUC и LVSH приведены без учета поправки за разность высот установки светодальномера и отражателя над центром, высота светодальномера над центром 12.65 м, расстояния, связанные с пунктами KLUC и LVSH приведены без учета поправки за разность высот установки светодальномера и отражателя над центром.

**Таблица 2.** Наклонные расстояния, приведенные к центрам знаков (Дш), на Ключевском ГДП в период 1988–2007 гг., м

Годы	Название линий											
	KOND-CIRK	CIRK-DALN	KOND-BELK	KOND-PLNA	BELK-DALN	KOND-DALN	CIRK-NIZN	ZLNY-APAH	ZLNY-PIRR	APAH-BELK	APAH-DVNY	PIRR-APAH
1988	3929.774	3000.065					3041.382	3481.137				
1989	3929.785	3000.076	8550.181	4583.017*			3041.386	3481.154				
1990	3929.777			4994.414			3041.384	3481.149	2529.758			
1990	3959.295						3012.102					
1991	3959.295			4994.411			3012.100	3481.153	2529.760			
1992	3959.298		8550.131	4994.419			3012.101		2529.762			
1993	3959.302	3018.674	8550.134	4994.417	4921.146	4232.572		3481.142	2529.763	7596.846		5880.442
1994	3959.308	3018.677	8550.160	4994.411	4921.156	4232.585		3481.143	2529.764	7596.858		
1995	3959.298	3018.677	8550.114		4921.139	4232.568		3481.135	2529.766	7596.848		5880.453
1996	3959.306	3018.681	8550.116	4994.418	4921.147	4232.571		3481.147	2529.766	7596.862		5880.448
1997	3959.306	3018.680	8550.114	4994.415	4921.146	4232.577	3012.097	3481.142	2529.772	7596.854	3451.086	5880.437
1998			8550.120	4994.422	4921.157	4232.578		3481.138	2529.769	7596.870	3451.080	5880.465
1999	3959.289	3018.677	8550.125	4994.415	4921.164	4232.592		3481.134	2529.768			5880.456
2000	3959.288	3018.668	8550.120	4994.417	4921.137	4232.573		3481.136	2529.778	7596.875		5880.464
2001	3959.294	3018.668	8550.148	4994.399		4232.576		3481.135	2529.778	7596.869		5880.444
2002	3959.296	3018.682	8550.144	4994.390	4921.137	4232.584		3481.122	2529.782	7596.870	3451.053	5880.452
2003	3959.300	3018.700	8550.113	4994.408	4921.151	4232.582		3481.122	2529.780	7596.863	3451.049	4327.522
2004	3959.306	3018.670		4994.390	4921.152	4232.576		3481.139	2529.778	7596.872	3451.050	4327.546
2005	3959.297	3018.677	8550.110	4994.399				3481.114	2529.785		3451.048	4327.548
2006	3959.293	3018.679	8550.111	4994.393	4921.141	4232.593		3481.118	2529.788	7596.874	3451.046	4327.573
2007	3959.292	3018.683	8550.114	4994.415	4921.140	4232.573	3012.082	3481.109	2529.787	7596.864	3451.046	4327.531
2012	3959.293	3018.665	8550.114	4994.406	4921.131	4232.573	3012.079	3481.076	2529.808	7596.858	3451.041	4327.559
2013	3959.291	3018.661	8550.112	4994.408	4921.136	4232.573	3012.081	3481.072	2529.810	7596.856	3451.046	4327.558
2014	3959.293	3018.665	8550.112	4994.406	4921.129	4232.574	3012.078	3481.055	2529.821	7596.849	3451.042	4327.560

Таблица 2. Окончание

Годы	Название линий											
	KOND-NIZN	ZLNY-708	ZLNY-OTKR	ZLNY-STEL	KOND-SKLA	MALY-PLNA	KOND-KELL	MALY-KLUC	ZLNY-LAGR	BELK-PIRR	ZLNY-DVNY	ZLNY-BELK
1988				3613.280	4003.852		4426.449					
1989		2225.837	3416.637						7947.371			5261.567
1990		2225.845	3416.623						7947.327			5261.559
1990												
1991									7947.346			
1992									7947.356	5626.682		5261.570
1993						8008.027		14933.675	7947.299	5626.673		5261.570
1994										5626.671		5261.568
1995										5626.669		5261.571
1996	6963.277									5626.665		5261.574
1997										5626.677	3301.129	5261.586
1998										5626.674	3301.160	5261.591
1999												
2000										5626.671		5261.600
2001										5626.680		5261.606
2002										5626.683	3301.117	5261.612
2003										5626.670	3301.111	5261.601
2004										5626.684	3301.119	5261.613
2005											3301.118	
2006										5626.667	3301.116	5261.620
2007											3301.107	5261.613
2012	6963.233					8008.029				5626.668	3301.090	5261.628
2013	6963.233					8008.031				5626.672	3301.092	5261.632
2014	6963.234					8008.027				5626.669	3301.080	5261.639

Примечание. \*Измерения производились на центральный пункт нивелирной площадки № 3 (гр. рп. 5374).

Измерения в период 1988–2007 гг.: 1 – пункт CTRK – это 2-ая бетонная тумба на конусе “Цирк”, пункт MALY – бетонный тур вблизи пункта гс. тр., пункт KELL – бетонный тур на той же сопке, где находится пункт гс. тр. с названием Подножие Келля, пункт OTRK – бетонный тур на конусе “S”, пункт STEL – пункт гс. тр. с названием Апахончич, пункт 708 – грунтовый репер, пункт LAGR – утрачен во время извержения 1993 г., пункты PLNA, NIZN, SRDN, PIRR, ZLNY, APAN, DVNY, BELK – бетонные туры.

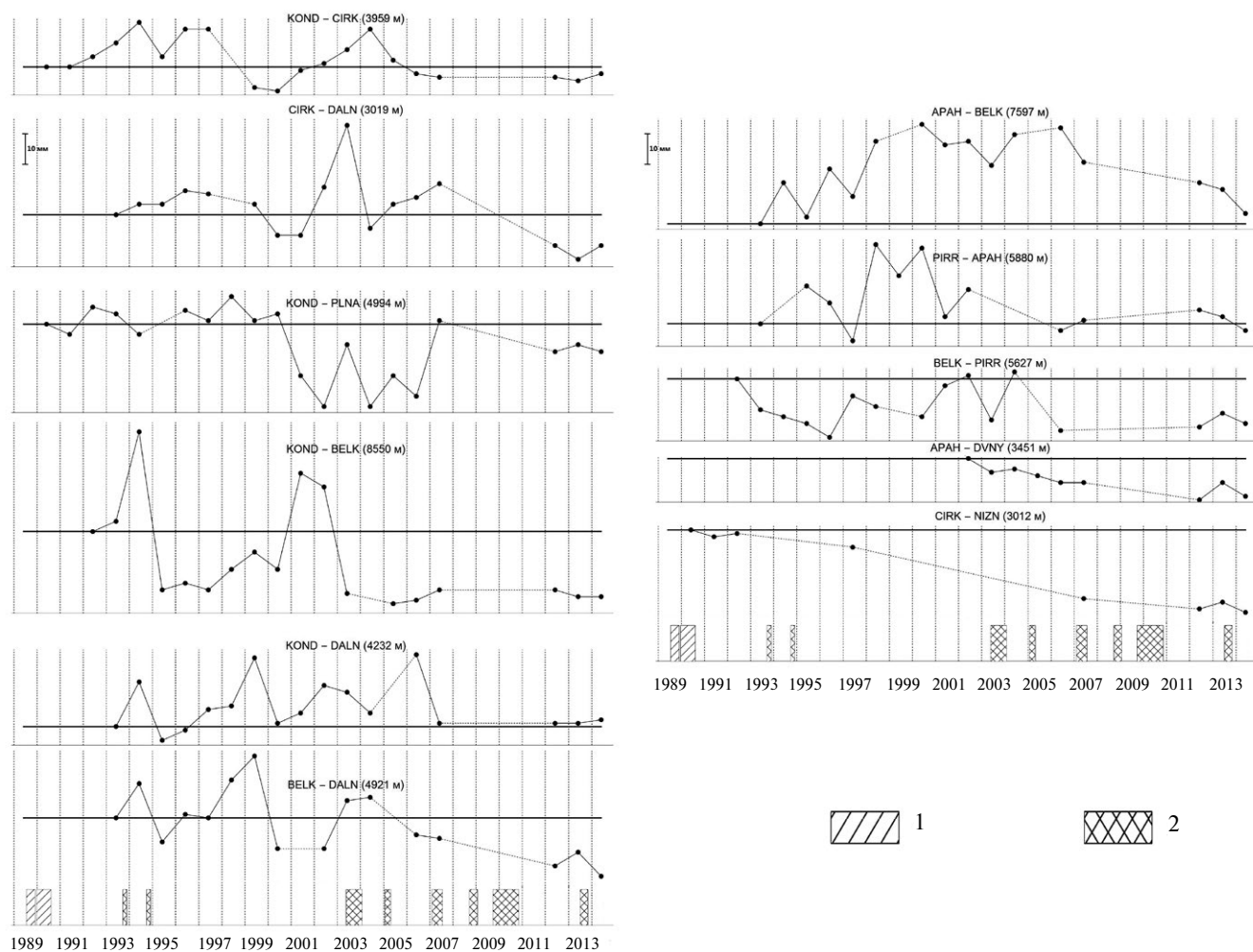
KOND-LVSH соответственно на 84, 34, 71 мм при точности  $\pm 15$  мм. Линии KOND-SKLA, KOND-CIRK, KOND-KARL также сократились, но величины их не выходят за пределы погрешности измерений. Все эти линии были измерены после побочного извержения – излияния лавы из трещины протяженностью примерно 1 км, возникшей 5 марта 1980 г. на северо-восточном склоне вулкана в 3 км южнее пункта CIRK. По-видимому, сокращение длин линий произошло в результате раскрытия этой трещины.

На рис. 16 показана схема измерения линий светодальномером СГ-3 (линия KLUC-MALY) и СП-2 (все остальные линии) на Ключевском полигоне в период 1988–2007 гг. По данным ежегодных измерений построены графики изменения длин линий (рис. 2).

Следует отметить, что в отдельные годы линии измерялись зимой, летом и осенью. Но всегда были измерения, выполненные в летнее время при положительных температурах. Как

известно, длины линий, измеренные в разных метеоусловиях, имеют сезонный ход. Чтобы исключить такое явление, во внимание брались измерения, выполненные только в летнее время (табл. 2).

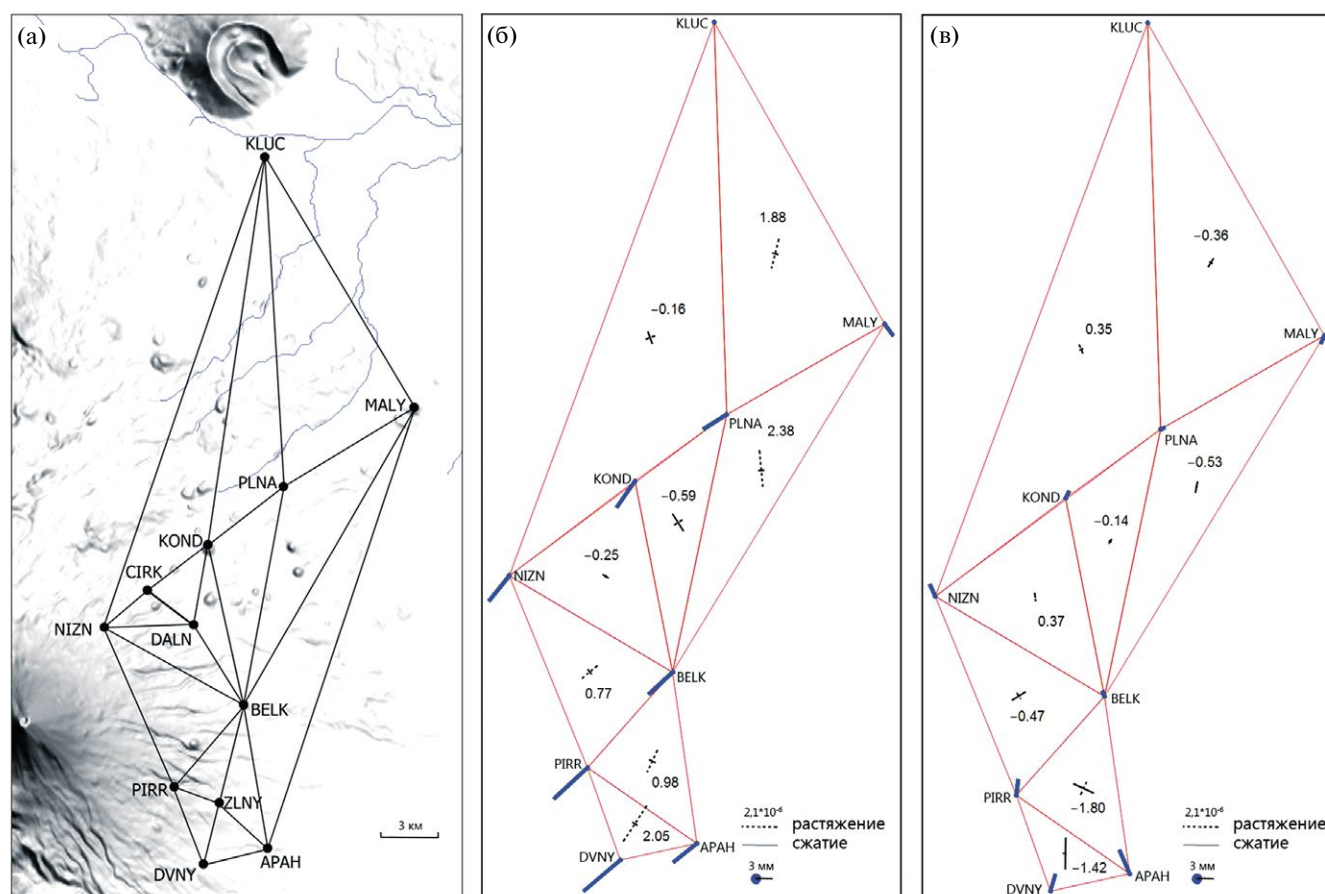
Тем не менее, графики изменения длин линий сильно ломанные. Такой разброс результатов явно не связан с событиями на вулкане (см. рис. 2). Изменения длин линий в отдельных случаях превышают погрешности измерений  $\pm(2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D)$ , но скорее всего, это объясняется невозможностью корректно учитывать поправку на метеоусловия по трассе измеряемой линии. Начиная с 2012 г., ежегодно в апреле на северо-восточном склоне вулкана Ключевской на пунктах, заложенных в прежние годы (рис. 3а), выполнялись наблюдения в течение 1–2-х суток двухчастотными спутниковыми геодезическими приемниками и определялись наклонные дальности методом GNSS технологии с погрешностью  $\pm(1 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$ .



**Рис. 2.** Графики изменения наклонных расстояний в 1989–2013 гг.

Периоды извержений вулкана показаны по данным [Федотов, Жаринов, 2007; Жаринов, Демянчук, 2016].

1 – побочные извержения; 2 – вершинные извержения.



**Рис. 3.** Места установки спутниковых геодезических приемников (залитые черные точки) на Ключевском ГДП (а) и горизонтальные деформации земной поверхности в 2012–2013 гг. (б), 2013–2014 гг. (в).

Для сопоставления результатов, определенных двумя независимыми методами, некоторые линии измерялись светодальномером СП-2. С переходом на GNSS технологию изменения наклонных дальностей резко уменьшились до первых миллиметров. На рис. 3б и рис. 3в представлены результаты этих работ в виде векторов горизонтальных смещений пунктов, дилатаций в треугольниках и величин и направлений главных осей деформаций в отдельных треугольниках.

Смещения пунктов, вычисленные относительно пункта KLUC (условно неподвижного), невелики, в пределах 1 см. В то же время обращают на себя внимание векторы пунктов Vz01, Vz06, Vz07, полученные из разностей измерений 04.2013–04.2012 гг. Они расположены к северу от Трещинного Толбачинского извержения 27.11.2012 г. и направлены в его сторону, как и вектор смещения пункта ALAI находящийся на южной стороне от места извержения, но намного ближе к нему [Толбачинское ..., 2017], чем пункты Ключевского полигона. Измерения 2014 г. показали весьма малые (первые мм) подвижки пунктов обратного направления, что подтверждает упругий характер произошедших

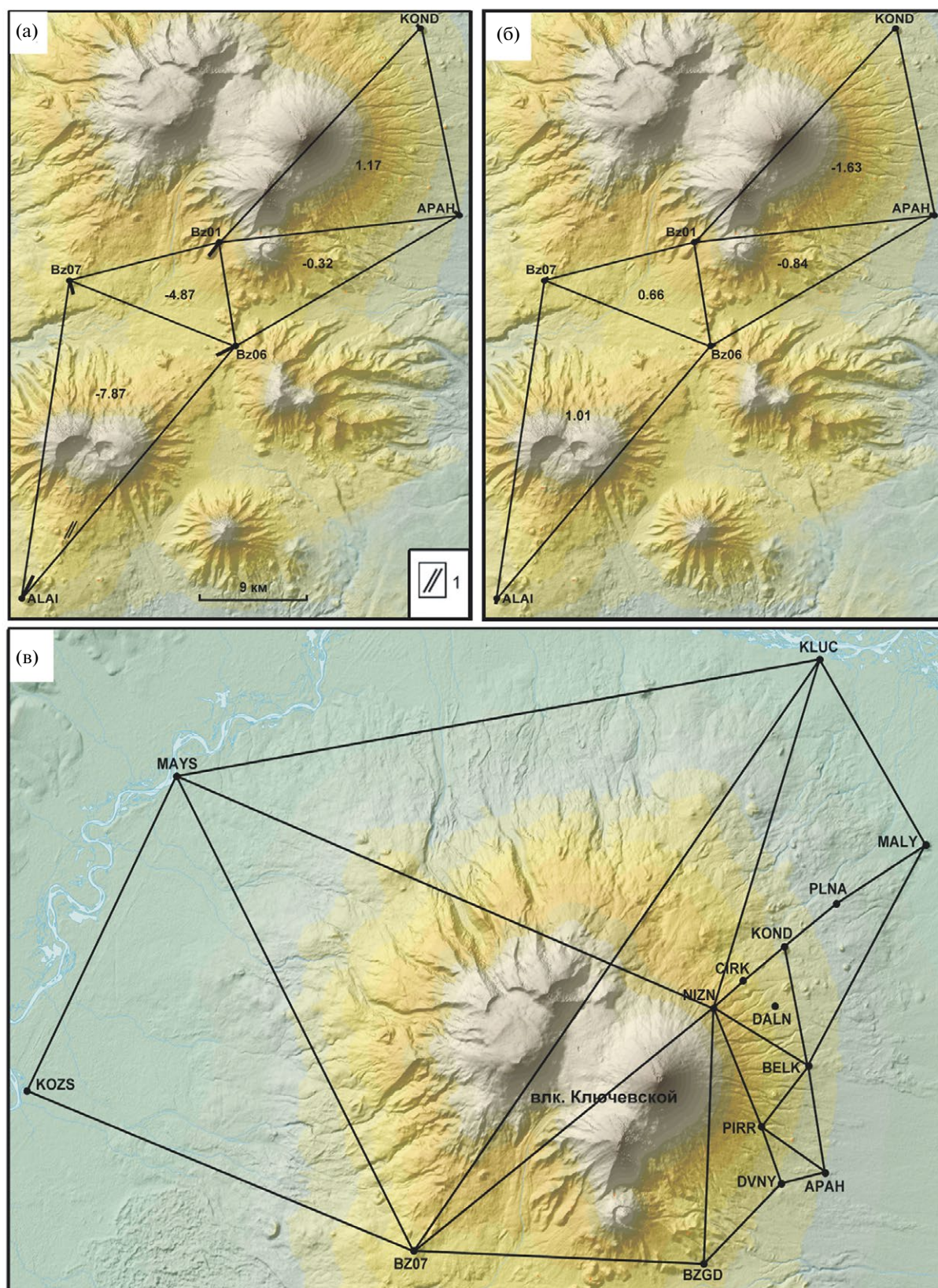
деформаций. Рис. 4а как раз демонстрирует противоположные движения пунктов, находящихся к северу и к югу от Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. (ТТИ 2012–2013).

Следует отметить, что повторными измерениями линий, связанных с пунктом ZLNY, определено, что этот пункт постоянно смещается в юго-восточном направлении. Возможно, это связано с неудачным выбором места закладки бетонной тумбы. В связи с этим пункт ZLNY исключен из повторных измерений в геодезической сети с 2017 г.

Пункты SRDN и LAGR, расположенные на северном склоне конуса вулкана Ключевской на отметках выше 1600 м, подвержены глубинной ползучести (см. рис. 16). Скорости смещений этих пунктов достигают первых сантиметров в год (максимальное значение близки 18 см/год) [Жаринов и др., 2018]. Возможно, наблюдаемые смещения этих пунктов вниз по склону провоцируют обвалы вулканических пород.

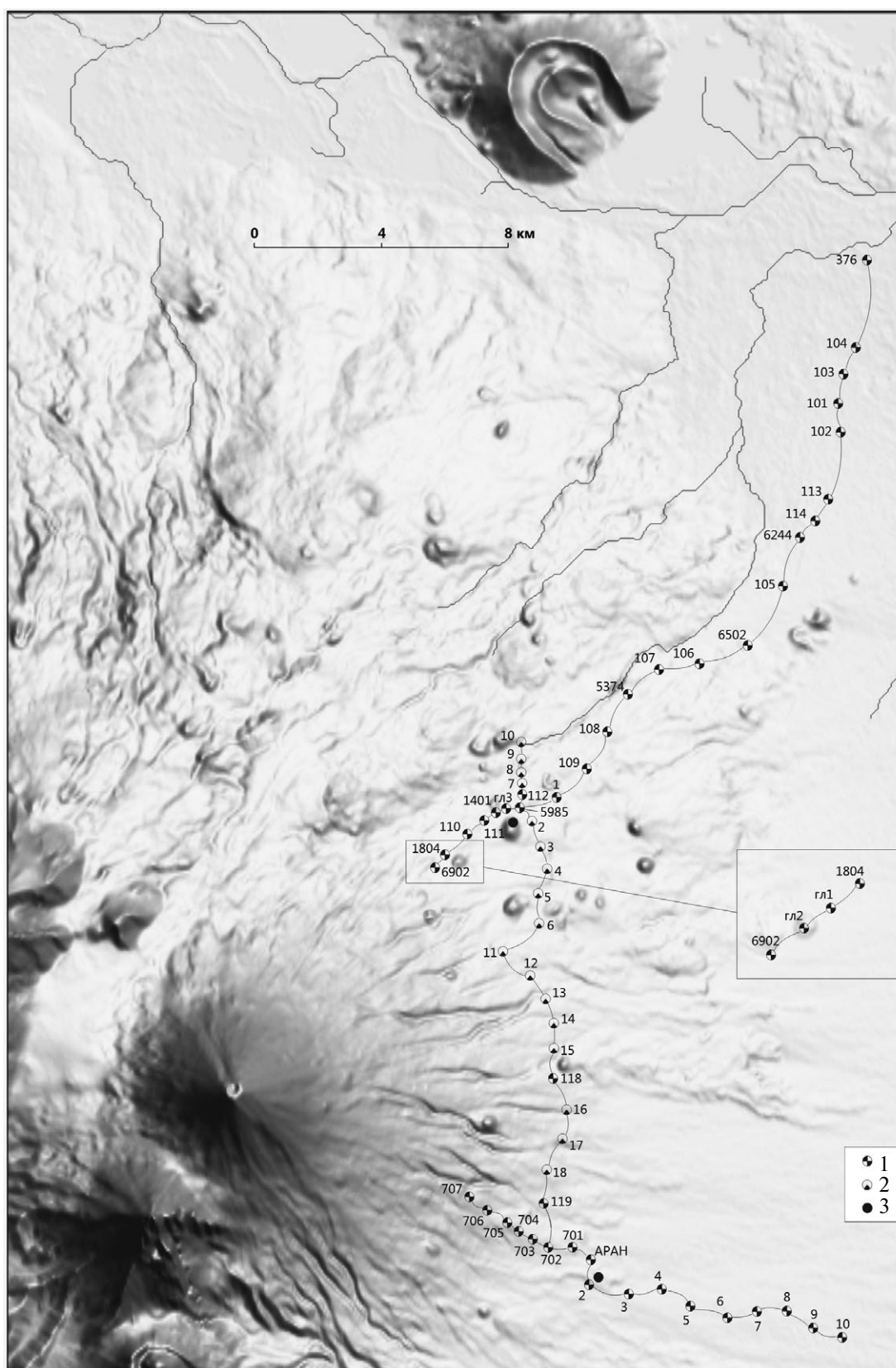
Современная система наблюдений горизонтальных деформаций земной поверхности на Ключевском ГДП состоит из пунктов для установки постоянно действующих спутниковых





**Рис. 4.** Примерная область распространения горизонтальных деформаций земной поверхности в связи с ТТИ – 2012–2013 гг.: в 2011–2013 гг. (а), 1 – место извержения; в 2013–2014 гг. (б); современная схема установки спутниковых геодезических приемников (черные залитые точки) на Ключевском ГДП (в).





**Рис. 5.** Схема высокоточных нивелирных профилей, заложенных на Ключевском ГДП в 1978–1985 гг. 1 – грунтовые реперы (рп. гл1, гл2, гл3 – заложены на глубине 6–12 м); 2 – скальные реперы; 3 – пункты триангуляции.

**Таблица 3.** Превышения по нивелирному профилю “Киргурич” от гр. рп. 376 до гр. рп. 6902 за 1980–2014 гг., м

Тип и номер нивелирного знака	Расстояние между реперами, км	Месяц и год производства работ, превышения						
		06.1983	06.-07.1984	09.-10.1984	06.1985	09.1985	06.1986	10.1986
1	2	3	4	5	6	7	8	9
гр. рп. 376								
	3.3	10.6595	10.6628	10.6642	10.6652			
104								
	1.0	5.5834	5.5844	5.5842	5.5840			
103								
	1.1	15.6918	15.6920	15.6918	15.6948			
101								
	1.0	15.6595	15.6600	15.6604	15.6594			
102								
	2.9	95.0760	95.0866	55.0328	55.0310			
113								
	0.7			10.6044	10.6060			
114								
	0.7			29.4480	29.4469			
гр. рп. 6244								
	2.1	69.5637	69.5597	69.5583	69.5598		157.9320	157.9450
105								
	2.4	88.3912	88.3888	88.3866	88.3852			
гр. рп. 6502								
	1.7	168.4820	168.4858	168.4861	168.4740		321.3828	321.3780
106								
	1.4	106.6825	106.6854	106.6867	106.6808			
107								
	1.3	46.2115	46.2120	46.2140	46.2110			
гр. рп. 5374								
	1.2	31.9922	31.9910	31.9929	31.9917	31.9980	237.7116	237.6910
108								
	1.5	72.2528	72.2520	72.2558	72.2497	72.2554		
109								
	1.1	58.7669	58.7688	58.7718	58.7696	58.7718		
1								
	1.2	74.6826	74.6843	74.6852	74.6825	74.6856		
гр. рп. 5985								
	0.4	27.3086	27.3074	27.3084	27.3063	27.3079	253.4760	253.4790
Гл. 3								
	0.2	74.4917	74.4888	6.7438	6.7431	6.7436		
гр. рп. 1401								
	0.9			67.7466	67.7430	67.7468		
111								
	0.9	75.2690	75.2700	75.2721	75.2648	75.2701		
110								
	1.2	76.4146	76.4120	76.4136	76.4106	76.4117		
гр. рп. 1804								
	0.2	14.9779	14.9778	14.9785	14.9773	14.9782	14.9780	14.9780
Гл. 1								
	0.2	13.1968	13.1960	-	13.1966	13.1958	13.1950	13.1960
Гл. 2								
	0.2	15.2754	15.2745	-	15.2722	15.2736	15.2714	15.2730
гр. рп. 6902								

Таблица 3. Продолжение

Тип и номер нивелирно- го знака	Расстояние между реперами, км	Месяц и год производства работ, превышения							
		1987	1989	2001	2002	2003	2004	2005	2006
		10	11	12	13	14	15	16	17
гр. рп. 376									
	3.3								
104									
	1.0								
103									
	1.1								
101									
	1.0								
102									
	2.9								
113									
	0.7								
114									
	0.7								
гр. рп. 6244									
	2.1								
105		157.9301	157.9408	157.9499	157.9706	157.9632	157.9707	157.9832	157.9915
	2.4								
гр. рп. 6502									
	1.7								
106									
	1.4	321.3947	321.3652	321.3919	321.4170	321.4142	321.4165	321.4045	321.4176
107									
	1.3								
гр. рп. 5374									
	1.2								
108									
	1.5								
109		237.6992	237.6879	237.7016	237.7271	237.7162	237.7281	237.7235	237.7536
	1.1								
1									
	1.2								
гр. рп. 5985									
	0.4								
гл. 3									
	0.2								
гр. рп. 1401									
	0.9	253.4851	253.4615	253.4865	253.5065	253.5025	253.5110	253.5088	253.5207
111									
	0.9								
110									
	1.2								
гр. рп. 1804									
	0.2	14.9788	14.9755	14.9759	14.9768	14.9763	14.9763	14.9761	14.9761
гл. 1									
	0.2	13.1963	13.1937	13.1915	13.1925	13.1932	13.1933	13.1920	13.1925
гл. 2									
	0.2	15.2706	15.2691	15.2625	15.2641	15.2620	15.2624	15.2605	15.2613
гр. рп. 6902									

Таблица 3. Окончание

Тип и номер нивелир- ного знака	Расстояние между реперами, км	Месяц и год производства работ, превышения							
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
		18	19	20	21	22	23	24	25
гр. рп. 376									
	3.3								
104									
	1.0								
103									
	1.1								
101									
	1.0								
102									
	2.9								
113									
	0.7								
114		40.0563	40.0567	40.0568	40.0562	40.0577	40.0569	40.0564	40.0563
	0.7								
гр. рп. 6244									
	2.1								
105		157.9602	157.9632	157.9706	157.9540	157.9612	157.9619	157.9572	157.9555
	2.4								
гр. рп. 6502									
	1.7								
106									
	1.4	321.4032	321.4018	321.4045	321.3915	321.4049	321.4003	321.4097	321.4068
107									
	1.3								
гр. рп. 5374									
	1.2								
108									
	1.5								
109		237.7064	237.7012	237.7058	237.7083	237.7079	237.7128	237.7074	237.7065
	1.1								
1									
	1.2								
гр. рп. 5985									
	0.4								
гл. 3									
	0.2								
гр. рп. 1401									
	0.9	253.4961	253.4848	253.4937	253.4872	253.4865	253.4913	253.4904	253.4870
111									
	0.9								
110									
	1.2								
гр. рп. 1804									
	0.2	14.9741	14.9743	14.9750	14.9745	14.9744	14.9735	14.9736	14.9730
гл. 1									
	0.2	13.1909	13.1917	13.1896	13.1896	13.1911	13.1900	13.1899	13.1896
гл. 2									
	0.2	15.2589	15.2572	15.2580	15.2570	15.2548	15.2573	15.2566	15.2557
гр. рп. 6902									

**Таблица 4.** Превышения между основными реперами нивелирного профиля “Киргурич” от гр. рп. 376 – гр. рп. 6902 за 1979–2014 гг., м

Год и месяц	Превышение между реперами							
	376-101	101-6244	113-6244	6244-6502	6502-5374	5374-5985	5985-1804	1804-6902
1979				157.9434	321.3634	237.6812	253.4595	43.4533
1980	31.9356	110.7436						
1981				157.9466	321.3766	237.7098	253.4780	43.4515
1982				157.9576	321.3878	237.6998	253.4916	43.4520
1983.06	31.9348	110.7455		157.9549	321.3760	237.6945	253.4840	43.4501
1984.07				157.9485	321.3832	237.6961	253.4782	43.4483
1984.10			40.0524	157.9450	321.3868	237.7056	253.4836	
1985.06			40.0529	157.9450	321.3658	237.6935	253.4678	43.4461
1985.09						237.7103	253.4800	43.4476
1986.06				157.9320	321.3828	237.7116	253.4760	43.4444
1986.11				157.9450	321.3780	237.6910	253.4790	43.4470
1987				157.9301	321.3947	237.6992	253.4851	43.4457
1989				157.9408	321.3652	237.6879	253.4615	43.4383
2001				157.9499	321.3919	237.7016	253.4865	43.4299
2002				157.9706	321.4170	237.7271	253.5065	43.4334
2003				157.9632	321.4142	237.7162	253.5025	43.4315
2004				157.9707	321.4165	237.7281	253.5110	43.4320
2005				157.9832	321.4045	237.7235	253.5088	43.4286
2006				157.9915	321.4176	237.7536	253.5207	43.4299
2007			40.0563	157.9602	321.4032	237.7064	253.4961	43.4239
2008			40.0567	157.9632	321.4018	237.7012	253.4848	43.4232
2009			40.0568	157.9706	321.4045	237.7058	253.4937	43.4226
2010			40.0562	157.9540	321.3915	237.7083	253.4872	43.4211
2011			40.0577	157.9612	321.4049	237.7079	253.4865	43.4203
2012			40.0569	157.9619	321.4003	237.7128	253.4913	43.4208
2013			40.0564	157.9572	321.4097	237.7074	253.4904	43.4201
2014			40.0563	157.9555	321.4068	237.7065	253.4870	43.4183

приемников и пунктов, на которых установка спутниковых приемников выполняется на 1–2 суток (см. рис. 4в). Здесь пункты KLUCH, MAYS, KOZS, BZ07, BZGD являются постоянно действующими, принадлежат и обслуживаются КФ ГС РАН.

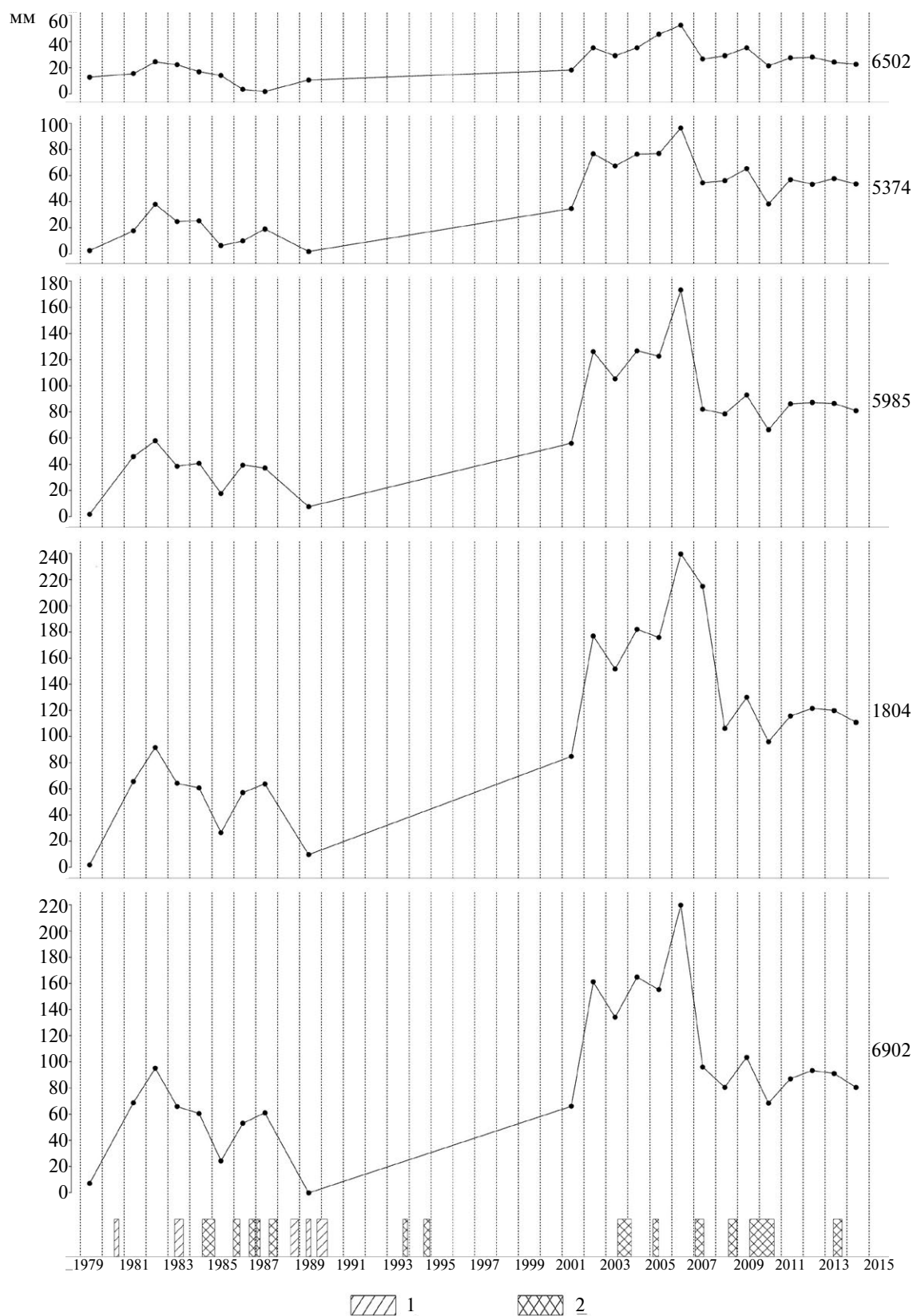
Методом GNSS технологии превышения между пунктами на коротких линиях определяются с худшей точностью, чем геометрическим нивелированием I–II классов, поэтому для определения вертикальных смещений применялся метод высокоточного геометрического нивелирования. Вертикальные движения земной поверхности на склонах вулкана определялись нивелированием II класса с погрешностью  $\pm 1 \text{ мм} \cdot \sqrt{L}$ , где  $L$  – расстояние между реперами (рп.) в км (рис. 5). Наиболее продолжительный и представитель-

ный ряд наблюдений (1979–2014 гг.) получен по радиальному профилю “Киргурич” северо-восточного направления протяженностью 28.8 км (табл. 3, табл. 4).

Реперы на профиле “Киргурич” заложены в 1978 г., начальная нивелировка выполнена в 1979 г. Величины вертикальных смещений реперов относительно рп. 376 в период 1979–1983 гг. приведены в работе [Жаринов, Еремеев, 1985].

Замечено, что во время извержения происходит заметное опускание земной поверхности даже на расстоянии 24 км от вершины вулкана (рп. 5374), и оно возрастает по мере приближения к ней и на расстоянии 11 км от вершины кратера (рп. 6902) составляет 40 мм (рис. 6, измерения 1982–1983 гг.). После побочного

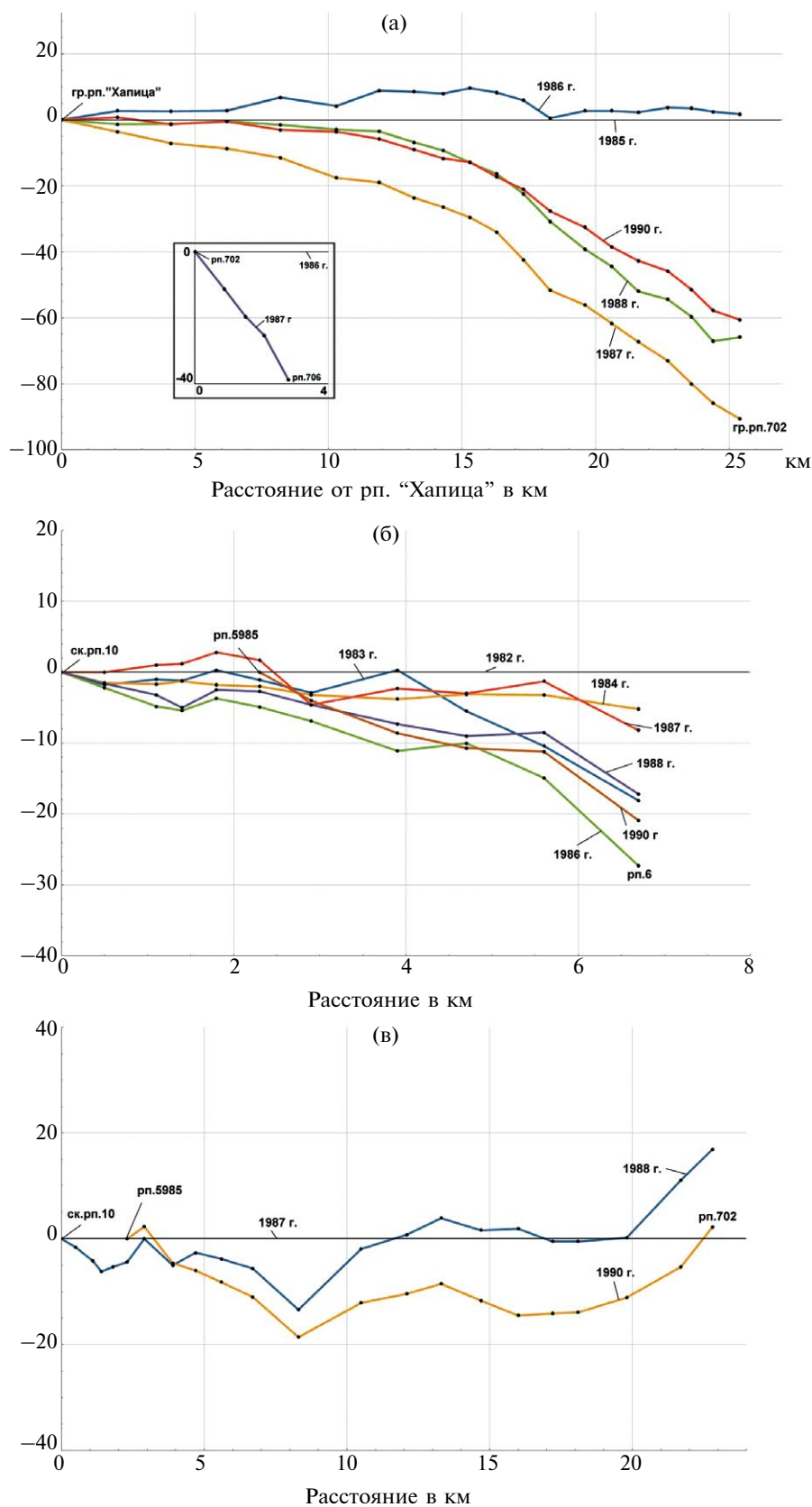




**Рис. 6.** Вертикальные смещения реперов на профиле “Киргурич” за 1979–2014 гг.

В нижней части рисунка показаны периоды извержений вулкана Ключевской [Федотов, Жаринов, 2007; Жаринов, Демянчук, 2016].

1 – побочные извержения; 2 – вершинные извержения.



**Рис. 7.** Вертикальные смещения по радиальному профилю от гр. рп. "Хавица" — гр. рп. 702 (а), а также вертикальные смещения по субгоризонтальным профилям: ск. рп. 10 — ск. рп. 6 (б), ск. рп. 10 — гр. рп. 5985 — гр. рп. 702 (в).

**Таблица 5.** Превышения по нивелирному профилю “Хапица – с/ст Апахончич” от гр. рп. Хапица – гр. рп. 702 – гр. рп. 707 за 1985–1990 гг., м

Тип и номер нивелирного знака	Расстояние между реперами, км	Год производства и превышения				
		1985	1986	1987	1988	1990
гр. рп. Хапица						
	2.1	23.1640	23.1667	23.1604	23.1627	23.1647
гр. рп. 22						
	2.0	22.7299	22.7298	22.7264	22.7300	22.7279
гр. рп. 20						
	2.1	25.7040	25.7042	25.7024	25.7048	25.7048
гр. рп. 18						
	2.0	36.3224	36.3264	36.3196	36.3213	36.3199
гр. рп. 16						
	2.1	47.8422	47.8396	47.8361	47.8408	47.8416
гр. рп. 14						
	1.6	39.6394	39.6441	39.6380	39.6388	39.6372
гр. рп. 12						
	1.3	40.3218	40.3214	40.3172	40.3185	40.3186
гр. рп. 11						
	1.1	33.2583	33.2578	33.2554	33.2558	33.2556
гр. рп. 10						
	1.0	32.7563	32.7579	32.7532	32.7526	32.7552
гр. рп. 9						
	1.0	37.2298	37.2285	37.2254	37.2264	37.2253
гр. рп. 8						
	1.0	36.9898	36.9874	36.9814	36.9838	36.9860
гр. рп. 7						
	1.0	38.8782	38.8728	38.8689	38.8698	38.8716
гр. рп. 6						
	1.3	53.9716	53.9738	53.9672	53.9632	53.9667
гр. рп. 5						
	1.0	49.3688	49.3688	49.3632	49.3636	49.3629
гр. рп. 4						
	1.0	53.5864	53.5860	53.5808	53.5788	53.5822
гр. рп. 3						
	1.1	61.2261	61.2275	61.2204	61.2237	61.2230
гр. рп. 2						
	0.9	52.6426	52.6424	52.6356	52.6373	52.6369
гр. рп. АРАН						
	0.8	40.1932	40.1922	40.1873	40.1858	40.1869
гр. рп. 701						
	1.0	52.3810	52.3802	52.3763	52.3822	52.3782
гр. рп. 702						
	1.1		100.4360	100.4247		
гр. рп. 703						
	0.8		75.1430	75.1346		
гр. рп. 704						
	0.7		83.4147	83.4090		
гр. рп. 705						
	0.9		110.9235	110.9101		
гр. рп. 706						
	0.8			124.8306		
гр. рп. 707						
гр. рп. 706						
			53.9316	53.9247		
ск. рп. 707						

извержения “Предсказанный” и серии вершинных извержений в 1983–1985 гг. величина опускания составила 70 мм (см. рис. 6, период наблюдений 1982–1985 гг.). После следующей серии побочных и вершинных извержений с 1987 по 1989 гг. произошло опускание на 60 мм. В целом наблюдается знакопеременный характер смещений земной поверхности при тренде, показывающем на подъем склона вулкана на всем участке от рп. 6244 до конечного рп. 6902. Величина подъема возрастает по мере приближения к вершине вулкана. С 1979 г. по

2014 г. подъем составил 12 см (рп. 1804), а максимальная величина его в 2006 г. была 23.6 см (см. рис. 6, рп. 1804). Приведенные выше вертикальные смещения являются относительными, т.е. определены от опорного условно неподвижного рп. 6244, удаленного от кратера вулкана на 27 км. Самым “подвижным” оказался рп. 1804, расположенный в 11.4 км от кратера.

С 2001 г. по 2006 г. вновь происходил значительный подъем СВ склона вулкана. Величина подъема ближайшего к кратеру вулкана рп. 6902 за это время составила 15.8 см. После

**Таблица 6.** Превышения по нивелирному профилю ск. рп. 10 – гр. рп. 5985 – ск. рп. 6 – гр. рп. 702 за 1982–1990 гг., м

Тип и номер нивелирного знака	Расстояние, км	Год производства и превышения						
		1982	1983	1984	1986	1987	1988	1990
ск. рп. 10								
	0.5	23.8136	23.8118	23.8121	23.8114	23.8136	23.812	
ск. рп. 9								
	0.6	36.2970	36.2978	36.2968	36.2944	36.298	36.2954	
ск. рп. 8								
	0.3	13.3472	13.3470	13.3476	13.3466	13.3474	13.3454	
ск. рп. 7								
	0.4	–5.5241	–5.5226	–5.5246	–5.5224	–5.5225	–5.5216	
гр. рп. 112								
	0.5	–8.6472	–8.6486	–8.6474	–8.6484	–8.6483	–8.6474	
гр. рп. 5985								
	0.6	1.8840	1.8822	1.8828	1.8820	1.8777	1.8821	1.8800
ск. рп. 2								
	1.0	61.5980	61.6012	61.5974	61.5938	61.6003	61.5953	61.5934
ск. рп. 3								
	0.8	–9.4657	–9.4715	–9.4650	–9.4646	–9.4664	–9.4640	–9.4678
ск. рп. 4								
	0.9	42.6313	42.6264	42.6312	42.6264	42.6330	42.6318	42.6308
ск. рп. 5								
	1.1	37.4161	37.4084	37.4141	37.4037	37.4092	37.4074	37.4064
ск. рп. 6								
	1.6					50.8046	50.7968	50.7970
ск. рп. 11								
	2.2					–97.4289	–97.4174	–97.4224
ск. рп. 12								
	1.6					–14.4349	–14.4322	–14.4332
ск. рп. 13								
	1.2					2.7775	2.7806	2.7794
ск. рп. 14								
	1.4					7.8294	7.8271	7.8262
ск. рп. 15								
	1.3					35.4726	35.4729	35.4698
гр. рп. 118								
	1.2					–1.9606	–1.9630	–1.9602
ск. рп. 16								
	0.9					1.0606	1.0606	1.0608
ск. рп. 17								
	1.7					–57.3902	–57.3895	–57.3874
ск. рп. 18								
	1.9					–44.1552	–44.1443	–44.1494
гр. рп. 119								
	1.1					–59.6235	–59.6177	–59.6160
гр. рп. 702								

продолжительного вершинного извержения 2007 г. вновь происходит опускание этого репера на 14 см ко второй половине 2008 г. В эти годы происходила серия вершинных извержений вулкана.

Во время проведения нивелировок по профилю “Киргурич” в 1979–1989 гг. и 2001–2014 гг. происходила значительная перестройка в работе вулкана. Первый период отличался мощными побочными и вершинными извержениями. Во второй отрезок времени происходили только вершинные извержения. Вне зависимости от характера извержений в указанные годы определен общей тренд — подъем склона вулкана, связанный с накоплением магмы в питающей системе вулкана. Значительный подъем склона чередовался опусканиями, сопровождавшими вершинные и побочные извержения.

Результаты нивелировок по профилю “Киргурич” использованы для оценок глубины и размеров источника давления под вулканом [Федотов, Жаринов, 2007; Федотов и др., 2010]. В период 1979–1990 гг., когда происходили вершинные и побочные извержения, центр эффективного давления в питающей магматической системе перемещался в интервале глубин 4–17 км. Во время вершинных извержений 2003–2013 гг. эффективный центр давления переместился на глубины 15–20 км. Перемещение центра давления на большие глубины после окончания извержений может быть связано с опустошением поверхностных магматических источников.

Вертикальные движения земной поверхности вдоль второго радиального нивелирного профиля длиной 29 км показаны на рис. 7а, построенному по данным табл. 5. Репер “Хапица”, относительно которого рассмотрены вертикальные движения земной поверхности, удален от кратера вулкана Ключевской на 38 км.

Первые измерения по профилю были выполнены в 1985 г., когда вулкан Ключевской не был активным. Последние измерения были сделаны в 1990 г. В период 1986–1990 гг. вулкан был активным, происходили вершинные и побочные извержения. Относительные вертикальные смещения земной поверхности происходили по всему профилю и проседания близлежащих к кратеру вулкана реперов достигли 91 мм (удаление их от кратера 9–10 км). В это же время регистрировались опускания склона вулкана по первому радиальному профилю “Киргурич”. Повидимому, это могло быть связано с уменьшением давления в магматическом очаге вулкана Ключевской в ходе серии побочных и вершинных извержений в это время.

По текущему нивелирному профилю скальный репер (ск. рп.) 10 — грунтовый репер (гр. рп.) 5985 — ск. рп. 6 — гр. рп. 702, про-

ложенному примерно по горизонтали относительно кратера (см. рис. 5), на абсолютных высотах, колеблющихся от 820 м (ск. рп. 10) до 1063 м (ск. рп. 11), нивелирование выполнялось не в полном объеме: в 1982–1984 гг., 1986 г. от ск. рп. 10 до ск. рп. 6; в 1987, 1988 гг. по всему ходу; в 1990 г. от гр. рп. 5985 до гр. рп. 702 (табл. 6). Изменения превышений по этому профилю показаны на рис. 7б и рис. 7в.

Самые близкие к кратеру вулкана Ключевской реперы этого профиля ск. рп. 11 (абсолютная высота 1063 м) и ск. рп. 6 (абсолютная высота 1013 м), оказались наиболее подвижными, чем остальные реперы на этом профиле. Максимальные подвижки (опускания) происходили после побочного извержения “Предсказанный” в 1983 г. и после побочного извержения “Скуридина” в конце 1989 г. и начале 1990 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Относительные вертикальные движения земной поверхности на вулкане Ключевской, определенные из повторных нивелирований с погрешностью превышений  $\pm 1 \text{ мм} \cdot \sqrt{L}$ , где  $L$  — расстояние между реперами в км вдоль радиальных к вулкану профилей имеют в целом знакопеременный характер, однако, наблюдается тренд вертикальных смещений, увеличивающийся с приближением к его вершине; наблюдается корреляция во времени между извержениями и знаком движений (опускание, поднятие). С 1979 по 2014 гг. максимальная величина подъема составила 23.6 см при погрешности определения  $\pm 1 \text{ см}$ . Данные нивелировок использованы для оценок глубины эффективно-го источника давления. В период 1979–1990 гг., когда происходили вершинные и побочные извержения, центр эффективного давления в питающей магматической системе перемещался в интервале глубин 4–17 км. Во время вершинных извержений 2003–2013 гг. эффективный центр давления переместился на глубины 15–20 км. Перемещение центра давления на большие глубины после окончания извержений может быть связано с опустошением поверхностных магматических источников.

Изменения длин линий в окрестностях вулкана Ключевской в отдельных случаях превышают погрешности измерений ( $2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D$ ), однако они не связаны с событиями на вулкане, и скорее всего, это объясняется невозможностью корректно учитывать поправку за метеорологические условия по трассе измеряемой линии. С переходом на определение длин линий по GNSS технологии, изменения их резко уменьшились и составляют первые миллиметры.



Горизонтальные смещения пунктов, расположенных на северо-восточном подножии вулкана Ключевской, определялись в период 2012–2014 гг. относительно пункта, находящегося в пос. Ключи на расстоянии 32 км от кратера вулкана, методом GNSS технологии. Смещения за период 2012–2013 гг. были в пределах 6–10 мм и направлены в район Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 гг., что может свидетельствовать о связи наблюдаемых деформаций с этим извержением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонович К.М., Карник А.П., Клепиков А.Н. Спутниковый мониторинг земной поверхности // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2004. № 1. С. 4–10.
- Жаринов Н.А., Доброхотов Ю.С., Энман В.Б. Наблюдения наклонов земной поверхности уровенными наклономерами на Камчатке // Известия АН СССР. Физика Земли. 1978. № 1. С. 54–62.
- Жаринов Н.А., Энман В.Б., Скуридин Ю.Ф. и др. Об изучении деформаций земной поверхности на Ключевском вулкане (1978–1982 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 67–75.
- Жаринов Н.А., Еремеев Н.Н. Деформации земной поверхности Ключевского вулкана, предвращавшие и сопровождавшие извержение, предсказанное в 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 88–97.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Извержение вершинного кратера вулкана Ключевской (Камчатка) в феврале–июле 2007 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 38–49.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Вершинные извержения вулкана Ключевской (Камчатка) в начале XXI столетия, 2003–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 1–18.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В., Борисов И.А. Извержения вулкана Ключевской в 2015–2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 3–13.
- Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / Отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 421 с.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А. Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3–31.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
- Широков И.А., Жаринов Н.А., Перцев Б.П., Анохина К.М. Вариации наклонов земной поверхности на Камчатке в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 2009. № 6. С. 44–53.

## GEODESIC MONITORING OF GROUND DEFORMATIONS AT KLYUCHEVSKOY VOLCANO IN 1978–2014, KAMCHATKA

M. A. Maguskin\*, N. A. Zharinov\*\*, Yu. V. Demyanchuk

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

\*e-mail: magma@kscnet.ru

\*\*e-mail: nzhar@kscnet.ru

Received April 17, 2018

Measured values are given - slant distances and elevations between geodetic marks on the northeast slope of Klyuchevskaya volcano for 1978–2014. As a rule, a rise was observed before the secondary and summit eruptions, and the end of the eruptions was accompanied by the lowering of the volcano slope. According to the longest series of observations of vertical displacements from 1979 to 2014. on the "Kirgurich" radial profile, the rise of the volcano slope is determined to increase as it approaches its crater. The maximum displacements occurred two years before the start of the "Predskazannuy" side breakthrough in 1983, and before the summit eruptions of 2003–2004 and 2007. At a distance of 27 km from the crater of the volcano, the vertical displacements become insignificant. It is shown that points located at altitudes from 2000 meters to 3000 meters are subject to deep creep, i.e. sliding down. The displacement rates of such points reached 5–20 cm/year. Significant horizontal displacements of geodetic points occurred near incidental breaks on March 6, 1980 and March 8, 1983. From 1989–1993. until 2014, reductions of all lengths of lines from 5 to 20 mm were observed, which indicated compression of the northeast slope of Klyuchevskaya volcano.

**Key words:** Excess Incline, Line, Length, Speed, Eruption.