



УДК 551.24+528.2/3

М. А. Магуськин<sup>1</sup>, Ю. В. Демянчук<sup>1</sup>, Н. Н. Титков<sup>2</sup>,  
К. М. Магуськин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: magma@kscnet.ru*

<sup>2</sup> *Камчатский филиал ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 683 006*

## **Движения земной поверхности в зоне трещинных извержений на протяженном южном склоне вулкана Плоский Толбачик и в окрестностях вулкана Ключевской (Камчатка)**

Приводятся непосредственно измеренные величины – наклонные расстояния и превышения за период 2011–2014 гг. между твердо закрепленными геодезическими точками (реперами) в районе трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. и на северо-восточной окрестности вулкана Ключевской за период 1978–2014 гг. 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 сравнивать их с результатами прежних годов. Показано, что раскрытие трещины прорыва 27 ноября 2012 г. вызвало горизонтальные смещения пунктов в десятки сантиметров, но ширина её в верхних слоях земной коры была не более 1 м. Трещинное извержение сопровождалось слабым опусканием земной поверхности, до 2–3 десятков мм. После окончания извержения наметился обратный ход смещений, т. е. деформации были упругими. Доказано, что на склонах конуса вулкана Ключевской не следует закладывать геодезические знаки с целью изучения подвижек земной поверхности в связи с извержениями, так как в этом случае центры сползают вниз со скоростями первые сантиметры в год. По данным наиболее длинного ряда наблюдений за вертикальными движениями (1979–2014 гг.) высокоточным нивелированием по радиальному профилю выявлено медленное воздымание земной поверхности с увеличением его по мере приближения к вулкану. Частые вершинные извержения происходят на фоне общего воздымания земной поверхности, но всё в даже после таких извержений (без излияния лавы) происходят кратковременные опускания реперов, т. е. земной поверхности. На расстоянии 27 км от кратера вертикальные движения становятся незначительными. Наклон на базе 17,8 км составил 1,2 угловых секунд или 5,8 микро радиан. Значимые горизонтальные смещения геодезических пунктов произошли вблизи побочного прорыва лавы 5 марта 1980 г. С 1989–1993 г. до 2014 г. наблюдается незначительное сокращение всех длин линий от 5 до 20 мм, что является признаком сжатия земной поверхности в северо-восточной части окрестности вулкана Ключевской.

### **Введение**

Вулканические постройки на Камчатке, находящиеся на площади, ограниченной с востока хребтом Кумроч, с севера и запада рекой Камчатка и с юга речкой Толбачик, принято обобщенно объединить термином «Ключевская группа вулканов» (КГВ) [16].

Вулкан Плоский Толбачик, входящий в КГВ, является одним из действующих в этой группе и отличается от других, в том числе тем, что от его центрального кратера в юго-западном направлении протянулась на десятки километров зона шлаковых конусов, образованных в ходе последовательных трещинных извержений. Эти конуса постепенно остывали и не было случая активизации их в историческое время. Причины и механизм образования их объяснены в книге [2], которая полностью посвящена всестороннему изучению Большого тре-

щинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ 1975–1976 гг.), в том числе слежению за деформациями земной поверхности во время этого грандиозного события XX века [Гл. XIV. С. 472–513]. Ход деформаций, последовавших после окончания БТТИ 1975–1976 гг., за период 1978–2000 гг. рассмотрены в работе [11], а за период 2000–2011 гг. — в работе [10].

27 ноября 2012 г. в 17:45 по местному времени, примерно, в 3 км на юго-запад от кратера вулкана Плоский Толбачик началось очередное трещинное извержение [3]. Масштаб извержения удалось оценить с вертолёта через 43,5 часа с момента начала его. Трещины образовались в результате внедрения магмы в приповерхностные слои земной коры. Лава буквально фонтанировала на протяжении всей трещины. За 43,5 часа излившаяся лава распространилась на площади примерно

13,6 км<sup>2</sup>. При средней мощности её 5 м объём лавы составляет примерно 0,068 км<sup>3</sup>. По этим данным в первые часы извержения расход лавы составил более 400 м<sup>3</sup>/с или при плотности её 2,8 г/см<sup>3</sup> расход был более 1200 тонн в секунду [12]. По данным аэрофотосъёмки от 13 декабря 2012 г. общая длина зоны поверхностных трещин достигла 6 км [4]. Это извержение завершилось в августе 2013 г.

Вулкан Ключевской является не только главным вулканом в КТВ, он же самый высокий действующий вулкан Европы и Азии [16]. В северо-восточном секторе окрестности этого вулкана ведутся геодезические наблюдения за деформациями земной поверхности с 1978 г. и результаты этих работ изложены в работах [5, 6, 7, 17].

### **Деформации, вызванные трещинным Толбачинским извержением 2012–2013 гг.**

В районе происшедшего извержения имеются геодезические пункты (рис. 1), взаимное положение которых было известно по данным наклонных расстояний (табл. 1), определённых из высокоточных спутниковых геодезических наблюдений (метод GNSS технологии). Горизонтальные движения пунктов, показанные на рис. 1 являются относительными, т. е. величины и направления их определены при условии неподвижности пункта Белая Горка (BGRK), удаленного от определяемых на 10–15 км. Величины векторов 34 см и 22 см получены из сравнения длин линий за 1977 и 2014 гг. Мы считаем, что несмотря на то, что за 27 лет не было непрерывных и частых измерений длин линий на пункты NVLV и 21, такие подвижки произошли в момент образования трещин прорыва лавы. Движения пунктов 20, ALAI, 170 соответственно на 3 см, 4 см, 3 см отражают их подвижки по данным наблюдений в 2011 и 2014 гг., если же и рассматривать по данным 2011 и 2013 гг., то величины подвижек тех же пунктов — 4 см, 6 см, 4 см соответственно, т. е. существенно больше в августе 2013 г. по сравнению с данными за август 2014 г. Такой обратный характер горизонтальных движений говорит об упругом характере деформаций. Векторы горизонтальных подвижек пунктов, удалённых от мест извержений на 7–8 км, направлены в район прорыва магм по протяжённой питающей трещине. Величины векторов определены с погрешностью ±4 мм.

Площадная плоская деформация земной поверхности изучалась методом вычисления в каждом треугольнике дилатации (относительно увеличения площади треугольника), величин и направлений взаимно-перпендикулярных главных осей плоской деформации [8, 13]. Они получены по разностям измерений, выполненных в 2011, 2013, 2014 гг. (рис. 2). Дилатации по разностям измерений в 2011 и 2013 гг. и в 2011 и 2014 гг. — положительные, до  $6 \cdot 10^{-6}$  при погрешности определения  $(1-2) \cdot 10^{-6}$ , а по разностям измерений в 2013 и 2014 гг. они находятся в пределах погрешностей определения. Оси растяжения имеют северо-северо-восточное на-

правление со значениями до  $9 \cdot 10^{-6}$  в относительной мере. Эти данные говорят о том, что извержение сопровождалось ощутимым растяжением земной поверхности на местности, расположенной в 8–14 км юго-юго-западном направлении от двух центров извержений 2012–2013 гг.

Определение вертикальных движений пунктов относительно того же, условно неподвижного пункта BGRK, было возможно только для пунктов 20, Алаида (ALAI), 170, Высокая, так как на самых близких к трещинам прорыва пунктах в прежние годы (после 1977 г.) наблюдения не производились. Извержение сопровождалось опусканием земной поверхности, ощутимым на расстоянии 7–8 км от мест прорыва лавы, так как пункты 20, ALAI, 170 опустились соответственно на 27, 34, 28 мм. Однако, к условно неподвижному пункту BGRK близко «подошел» лавовый поток, фронт которого имел высоту 20–30 м и находился на расстоянии примерно 800 м от пункта. Под действием такой массы пункт BGRK, по-видимому, начал медленно опускаться. Хотя мы не располагаем инструментальным доказательством этого явления, но подобное известно из наблюдений за вертикальными движениями земной поверхности после заполнения крупных водохранилищ, строительстве крупных жилых массивов с высотными зданиями. С учётом этого, вполне вероятного факта и результатов взаимной увязки измеренных превышений между пунктами, наиболее реальные опускания пунктов 20, ALAI, 170 были соответственно 22, 27, 19 мм по данным наблюдений в 2011 и 2013 гг. По наблюдениям в июле 2014 г. значимых вертикальных подвижек этих пунктов не обнаружено.

По имеющимся данным [11], где на рис. 6 показаны горизонтальные подвижки пунктов «Водопадный» (ВДП) и Алаид (ALAI), которые расположены в 5–7 км от места ТТИ 2012–2013 гг., можно предполагать, что в районе будущего прорыва происходило медленное локальное растяжение земной поверхности.

### **Деформации в окрестностях вулкана Ключевской в период 1978–2014 гг.**

С целью изучения деформаций земной поверхности в связи с активностью вулкана Ключевской, в 1978 г. на его северо-восточной окрестности были начаты геодезические измерения [5]. В последующих годах состав работ в методическом плане увеличился, была привлечена производственная организация — Предприятие № 2 ГУГК при СМ СССР (теперь ОАО «Дальаэрогеодезия»). Территория, охваченная геодезическими и другими работами, стала называться «Ключевской геодинамический полигон» (КДП).

На рис. 3 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, явля-

ются единичными, т. е. измерены только в 1979 г. в течение нескольких дней с погрешностью не хуже  $2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \text{ Д}$ . Повторных измерений этих линий до настоящего времени не проводилось. Поскольку центры пунктов являются долговременными и сохраняются в будущем, 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. 2). За шесть лет произошло значительное сокращение длин линий KOND-KELL, KOND-DALN, KOND-LVSH соответственно на 84, 34, 71 мм при точности  $\pm 15 \text{ мм}$ . 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 прорыва лавы.

На рис. 4 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. 5). Однако отметим, что в отдельные годы линии измерялись весной, летом и осенью, но всегда были измерения, выполненные в летнее время, как правило, в июле-августе. 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. 3). Тем не менее, графики изменения длин линий сильно ломанные. Такой разброс результатов явно не связан с событиями на вулкане, которые отмечены в нижней части рис. 5. Хотя изменения длин линий в окрестностях вулкана Ключевской в отдельных случаях превышают погрешности измерений ( $2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \text{ Д}$ ), но они не связаны с событиями на вулкане, и скорее всего, это объясняется невозможностью корректно учитывать поправку за 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. 6), выполняются 1–2-х суточные наблюдения 2-х частотными спутниковыми геодезическими приемниками и наклонные расстояния между пунктами определяются методом GNSS технологии [1] с гарантированной погрешностью не более ( $1 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} \text{ Д}$ ). При этом некоторые линии измеряются светодальномером СП-2, в основном, из методических соображений, т. е. для сопоставления результатов, определенных двумя независимыми методами. С переходом на GNSS технологию изменения наклонных рас-

стояний резко уменьшились и составляют первые миллиметры (ожидается в будущем, что графики изменения их не будут сильно ломанными). На рис. 7 представлены результаты этих работ в виде векторов горизонтальных смещений пунктов, дилатаций в треугольниках и величин и направлений главных осей плоской деформации в пределах площади треугольника. Хотя смещения пунктов, вычисленные относительно пункта KLUC (условно неподвижного) невелики, в пределах 1 см, обращают на себя внимание векторы, полученные из разностей измерений 04,2013–04,2012 гг. Они направлены в сторону Толбачинского трещинного извержения 27 ноября 2012 г. ода, как и векторы смещений пунктов 20, ALAI, 170, которые находятся на южной стороне от этого же извержения, но намного ближе к нему, чем пункты Ключевского дола. Измерения 2014 г. показали очень маленькие (первые мм) подвижки пунктов обратного характера, что подтверждает упругий характер происшедших деформаций. рис. 8 как раз демонстрирует противоположность движений пунктов, находящихся на северной и южной сторонах от ТТИ 2012–2013 гг. Кроме того, необходимо особо отметить, что регулярные слежения за горизонтальными смещениями пунктов методом повторных измерений расстояний в окрестностях вулкана Ключевской обнаружили два бесспорных факта:

1. Пункт ZLNY имеет собственную подвижку в юго-восточном направлении, что связано с неудачным выбором места закладки бетонной тумбы. В связи с этим пункт исключается из последующего определения его местоположения.

2. Пункты, расположенные на склонах конуса вулкана Ключевской на отметках выше 1600 м медленно сползают вниз со скоростью первые сантиметры в год (измеренное максимальное значение 18 см в год). Причина — текучесть мерзлого грунта, перемешанного со льдом под действием силы тяжести. Отсюда следует — нет смысла закладывать геодезические знаки на склоне конуса вулкана Ключевской с целью изучения движений земной поверхности в связи с извержениями.

Современная система слежения за деформациями земной поверхности на Ключевском ГДП состоит из пунктов установки постоянно действующих спутниковых приемников и устанавливаемых на 1–2 суток (рис. 9). Здесь пункты: KLUC, MAYS, KOZS, BZ07, BZGD — являются постоянно действующими, принадлежат и обслуживаются КФ ГС РАН.

Поскольку методом GNSS технологии превышения между пунктами на коротких линиях определяются с худшей точностью, чем геометрическим нивелированием I — II классов, то для определения вертикальных составляющих деформаций применяется метод высокоточного геометрического нивелирования.

Вертикальные движения земной поверхности вблизи вулкана Ключевской определялись нивели-

рованием с погрешностью определения превышений  $\pm 1 \text{ мм} \cdot \sqrt{L}$ , где  $L$  — расстояние между реперами в км по двум радиальным к вулкану профилям и поперечному к ним (рис. 10). Наиболее длинный ряд наблюдений (1979–2014 гг.) выполнен по радиальному профилю северо-восточного направления протяжённостью 18,4 км (таблицы 4, 5). Замечено, что во время извержения с излиянием лавы 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. 1804) составляет 40–45 мм (рис. 11, период наблюдений 1979–1983 гг.). В целом колебания земной поверхности по высоте знакопеременные, но наблюдается общий их тренд, показывающий воздымание земной поверхности на всём участке протяжённостью 13,2 км с увеличением его (воздымания) по мере приближения к вулкану (рис. 11). С 1979 г. по 2014 г. подъём (воздымание) составил 12 см (рп. 1804), а максимальная величина его в 2006 г. была 23,6 см (рис. 11, рп. 1804). Приведённые выше вертикальные движения являются относительными, т. е. определены от опорного условно неподвижного репера 6244, удаленного от кратера вулкана Ключевской на 27 км. Самым «подвижным» оказался рп. 1804, расположенный в 11,4 км от кратера. С 1979 по 2006 гг. превышение между рп. 6244 и рп. 1804 изменилось на 23,6 см на базе длиной 17,8 км. Наклон на этой базе составил 2,6 угловых секунд или 12,5 мкрд. С 1979 по 2014 гг. изменение превышения между этими реперами составило 10,8 см, что определяет наклон в 1,2 угловых секунд или 5,8 мкрд. Самый близкий к кратеру рп. 6902 (удаление 10,8 км) испытал меньшее воздымание, чем чуть более удалённый (11,4 км от кратера) рп. 1804. После 2006 г. земная поверхность резко просела в пределах от 33 мм (рп. 6502) до 123 мм (рп. 6902). Причину такого проседания затруднительно объяснить внешними признаками вершинного извержения вулкана Ключевской. рис. 12 («конский хвост») демонстрирует колебания уровня земной поверхности по радиальному нивелирному профилю на участке от рп. 6244 до рп. 6902 длиной 18,4 км. Он наглядно показывает знакопеременность вертикальных движений, связанных безусловно с активностью вулкана Ключевской. Глубокое и детальное понимание их возможно при организации непрерывных измерений.

Вертикальные движения земной поверхности вдоль второго радиального нивелирного профиля показаны на рис. 13, составленному по данным таблицы 6. Длина профиля 29 км. Репер «Хапица», относительно которого рассмотрены вертикальные движения земной поверхности, удален от кратера вулкана Ключевской на 38 км (на рис. 10 не показан). Первые измерения по профилю были выполнены в 1985 г., когда вулкан Ключевской был не активным. Последние измерения, из ряда очередных, были сделаны в 1990 г. В период 1986–1990 гг. вулкан

был активным, происходили вершинные извержения с излиянием лавы или без них, а также побочные извержения. Относительное проседание земной поверхности по всему профилю и проседание лежащих в кратере вулкана реперов до 91 мм (удаление их от кратера 9–10 км), по-видимому, связано с прорывом магм на поверхность в виде лавовых потоков и, как следствие, уменьшение давления в близповерхностном магматическом очаге вулкана Ключевской. Максимальный происшедший наклон земной поверхности на этом профиле составляет 0,7 секунд дуги или 3,4 мкрд.

По нивелирному профилю Ск. рп. 10 — Гр. рп. 5985 — Ск. рп. 6 — Гр. рп. 702, проложенному примерно по радиальной относительно кратера дуге (рис. 10) и на абсолютных высотах, колеблющихся от 820 м (Ск. рп. 10) до 1063 м (Ск. рп. 11) нивелирование выполнялось не в полном объёме: 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. 7). По этим данным на рис. 14 и 15 приведены изменения уровня земной поверхности вдоль этого хода в разные даты. Наиболее подвижным относительно Ск. рп. 10 оказались реперы Ск. рп. 11 (абсолютная высота 1063 м) и Ск. рп. 6 (абсолютная высота 1013 м), т. е. реперы наиболее близкие к кратеру вулкана Ключевской, чем остальные реперы на этом профиле. Максимальные подвижки (опускания) происходили после извержения вулкана с излиянием лавы в 1983 г. и после такого же извержения в конце 1989 и начале 1990 гг.

В работах [16, 17] вертикальные смещения реперов, находящихся на расстоянии 10–11 км от кратера вулкана Ключевской, объяснены миграцией глыбины источника магматического давления по вертикальному непрерывному каналу под вулканом на глубинах от 3 до 25 км. Существование такой связи доказательно показано в [10], но в целом подъём земной поверхности по мере приближения к центральному кратеру вулкана с 1979 по 2014 гг., по-видимому, связан другим процессом, возможно медленным увеличением объёма периферического магматического очага на небольшой глубине.

## Выводы

1. По геодезическим данным установлено: пункт государственной триангуляции NVLV, расположенный на конусе извержения 1941 г., примерно в 1 км от северного центра трещинного извержения 2012–2013 гг. и на западной стороне от трещины прорыва, сместился на 34 см в юго-западном направлении; геодезический центр, находящийся на восточной стороне от трещины прорыва и в сотнях метрах от южного центра этого же извержения, сместился на 22 см, и с большей вероятностью на 30 см в восточном направлении. По этим данным ширина трещины прорыва в верхней части земной коры составила несколько десятков сантиметров и, вероятно, меньше 1 м.

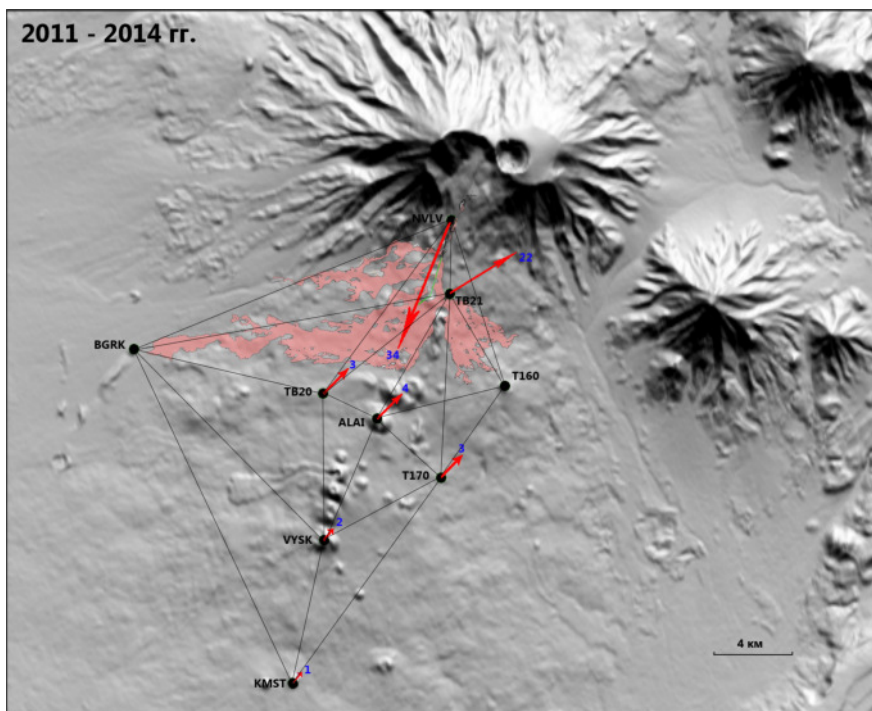


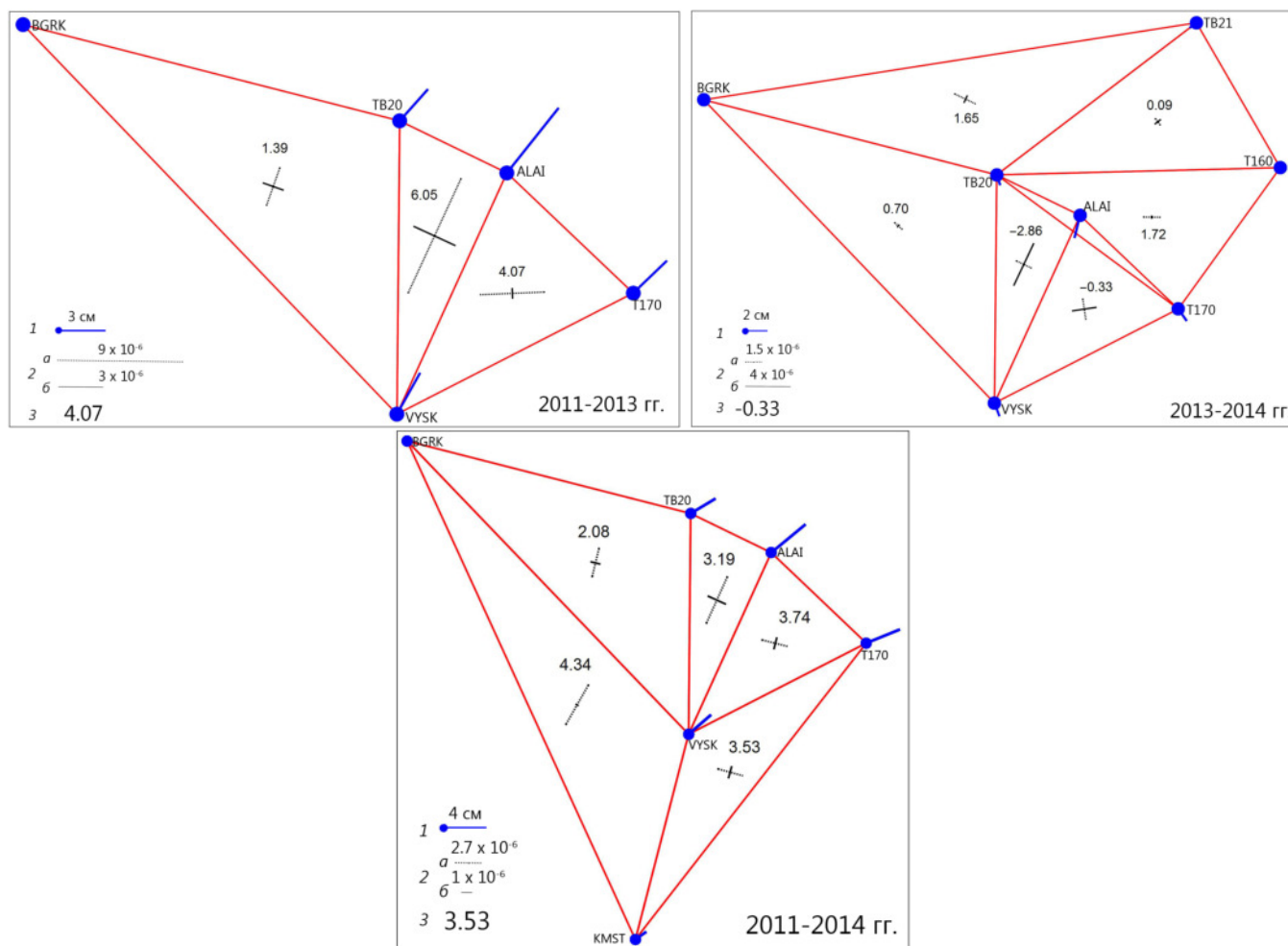
Рис. 1. Места установки спутниковых 2-х частотных геодезических приемников (чёрные кружки). Стрелки – векторы движения пунктов, величины их показаны цифрами в см.

Таблица 1. Наклонные расстояния и превышения, определенные методом GNSS технологии и приведенные к центрам знаков на Толбачинском ГДП в период 2011–2014 гг.

Название линий	Наклонные расстояния, м, и год определения			Разности, мм			Превышения, м, и год определения			Разности, мм		
	2011	2013	2014	2013-2011	2014-2013	2014-2011	2011	2013	2014	2013-2011	2014-2013	2014-2011
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ALAI-VYSK	6289,1672	6289,1894	6289,1745	22,2	-14,9	7,3	-357,2424	-357,2176	-357,2214	24,8	-3,8	21,0
ALAI-TB21	-	6859,4426	6859,4629	-	20,3	-	-	329,8206	329,8122	-	-8,4	-
ALAI-T170	4150,7115	4150,7120	4150,7180	0,5	6,0	6,5	-407,8316	-407,8244	-407,8275	7,2	-3,1	4,1
ALAI-T160	-	6269,0570	6269,0700	-	13,0	-	-	-79,0019	-79,0168	-	-14,9	-
ALAI-BGRK	12032,8642	12032,8726	12032,8828	8,4	10,2	18,6	-952,9955	-952,9646	-952,9794	30,9	-14,8	16,1
T160- BGRK	-	17707,7681	17707,7737	-	5,6	-	-	-873,9627	-873,9626	-	0,1	-
VYSK-TB21	-	13126,6230	13126,6223	-	-0,7	-	-	687,0381	687,0336	-	-4,5	-
VYSK-T160	-	11277,8297	11277,8373	-	7,6	-	-	278,2157	278,2046	-	-11,1	-
VYSK-BGRK	12807,2752	12807,2685	12807,2704	-6,7	1,9	-4,8	-595,7531	-595,7471	-595,7580	6,0	-10,9	-4,9
T170-VYSK	6290,2321	6290,2300	6290,2324	-2,1	2,4	0,3	50,5892	50,6068	50,6061	17,6	-0,7	16,9
T170-TB21	-	8758,7912	8758,7924	-	1,2	-	-	737,6449	737,6397	-	-5,2	-
T170-T160	-	5314,0497	5314,0541	-	4,4	-	-	328,8225	328,8107	-	-11,8	-
T170-BGRK	15807,7191	15807,7194	15807,7291	0,3	9,7	10,0	-545,1639	-545,1403	-545,1519	23,6	-11,6	12,0
TB20-VYSK	6945,9537	6945,9484	6945,9485	-5,3	0,1	-5,2	20,9908	21,0124	21,0139	21,6	1,5	23,1
TB20-TB21	-	7678,3013	7678,2968	-	-4,5	-	-	708,0506	708,0475	-	-3,1	-
TB20-T170	6874,5663	6874,5612	6874,5658	-5,1	4,6	-0,5	-29,5984	-29,5944	-29,5922	4,0	2,2	6,2
TB20-T160	-	8645,5036	8645,5057	-	2,1	-	-	299,2281	299,2185	-	-9,6	-
TB20-BGRK	9233,1548	9233,1648	9233,1703	10,0	5,5	15,5	-574,7623	-574,7346	-574,7441	27,7	-9,5	18,2
TB21-T160	-	5112,2791	5112,2797	-	0,6	-	-	-408,8225	-408,8290	-	-6,5	-
TB21-BGRK	-	15249,2474	15249,2438	-	-3,6	-	-	1282,7852	1282,7916	-	6,4	-
TB20-ALAI	2848,8397	2848,8357	2848,8438	-4,0	8,1	4,1	378,2332	378,2300	378,2353	-3,2	5,3	2,1
VYSK-KMST	6687,6752	-	6687,6814	-	-	6,2	-457,2406	-	-457,2302	-	-	10,4
T170-KMST	11834,1427	-	11834,1481	-	-	5,4	-406,6514	-	-406,6241	-	-	27,3
ALAI-KMST	12927,8831	-	12927,8968	-	-	13,7	-814,4830	-	-814,4516	-	-	31,4
TB20-KMST	13522,9332	-	13522,9319	-	-	-1,3	-436,2498	-	-436,2163	-	-	33,5
BGRK-KMST	17251,0740	-	17251,0642	-	-	-9,8	138,5125	-	138,5278	-	-	15,3
TB21-KMST	-	-	19692,8648	-	-	-	-	-	-1144,2638	-	-	-
BGRK-NVLV	-	-	16329,7948	-	-	-	-	-	1761,4928	-	-	-
ALAI-NVLV	-	-	10068,4038	-	-	-	-	-	808,5134	-	-	-
TB21-NVLV	-	-	3505,9766	-	-	-	-	-	478,7012	-	-	-
NVLV-T160	-	-	8288,3026	-	-	-	-	-	-887,5302	-	-	-
TB20- NVLV	-	-	10286,0618	-	-	-	-	-	1186,7487	-	-	-
T170- NVLV	-	-	12260,8263	-	-	-	-	-	1216,3409	-	-	-
VYSK-NVLV	-	-	16351,4407	-	-	-	-	-	1165,7348	-	-	-
NVLV-KMST	-	-	22991,6187	-	-	-	-	-	-1622,9650	-	-	-

Примечание: Здесь превышения – есть разность геодезических высот центров над общеземным эллипсоидом WGS-84. Для сравнения их с превышениями, определяемыми как разность нормальных высот геодезических центров. Необходимо знать высоту квазигеоида над эллипсоидом WGS-84 в точках установки спутниковых приёмников.





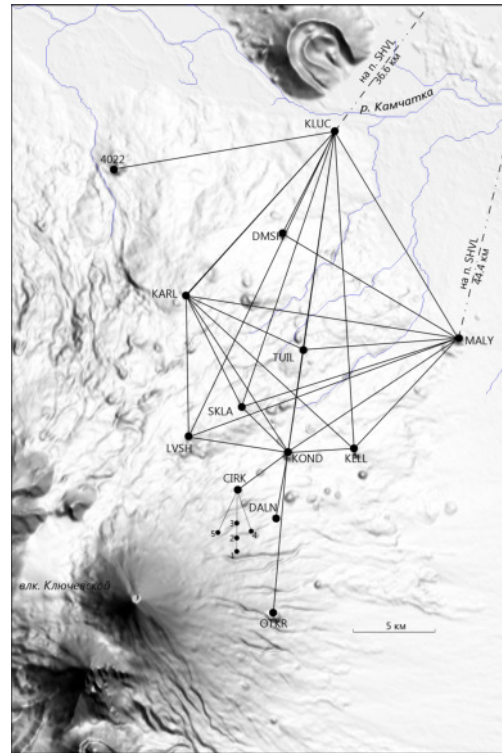
**Рис. 2.** Горизонтальные деформации земной поверхности, вызванные трещинным Толбачинским извержением 2012–2013 гг. 1 – вектор смещения пунктов; 2 – направления главных осей плоской деформации в пределах треугольника и их относительные величины в ед.  $10^{-6}$ : а – растяжение; б – сжатие; 2 – относительное изменение площади треугольника (дилатация) в ед.  $\cdot 10^{-6}$ .

**Таблица 2.** Наклонные расстояния, приведенные к центрам знаков (Дц) на Ключевском ГДП в период 1978-1984гг.

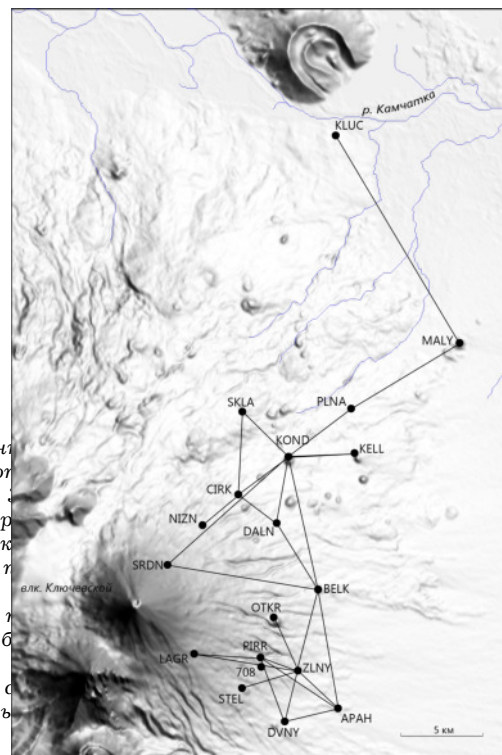
	название линий год производства работ разность (мм.) в период 1978-1984гг.					
	1978	1979	1980	1983	1984	
KOND-SKLA	4003,858	4003,843	4003,856	4003,863	4003,846	-12,0000000002
KELL	4426,478	4426,481	4426,47	4426,429	4426,394	-83,9999999998
DALN	4232,588	4232,584	4232,577	4232,56	4232,554	-33,9999999997
CIRK	3929,804	3929,792	3929,778	3929,788	3929,796	-8,0000000003
KLUC	20157,388	20157,362				
LVSH		6271,182			6271,111	
TUIL			6622,176		6622,171	
KARL		11793,189			11793,173	
OTKR					10515,026	
KLUC-KELL		20055,853				
TUIL		13535,453				
SKLA		17848,674				
LVSH		20968,251				
DMSH		6968,513				
KARL		13700,229				
SHVL		36598,552				
MALY		14934,442				
4022		14346,346				
KARL-KELL		14711,231				
LVSH		8855,741				
TUIL		8043,137				
SKLA		8135,704				
MALY-KELL		9675,383				
KOND		12984,918				
LVSH		18047,763				
SKLA		14094,163				
TUIL		9887,625				
KARL		17382,252				
DMSH		12923,22				
SHVL		44435,679				
CIRK-1			4102,308			
2			3733,847			
3			2278,946			
4			3675,077			
5			3833,912			

Примечания к измерениям в период 1978-1984гг.

1. Пункты LVSH, KARL, TUIL, MALY, OTKR, DMSH являлись пунктами геодезической сети. Пункт CIRK - 1-ая бетонная тумба не на самой высокой точке сопки, а на бетонных тумбах с принудительным центрированием. Точки 1, 2, 3 - скалах. Пункт KLUC - представлял собой деревянный сигнал на террасе, который был вынесен на столб сигнала с трех установок геодезического центра, центром была 12,65 м. Пункт SHVL - скальный репер, расположен на южном склоне вулкана Шивелуч.
2. Линии измерялись светодальномерами СГ-3 или Геодинетром-8 с точностью ± 1 мм.
3. Расстояния, связанные с пунктами KLUC и LVSH приведены без учета наклона, т.е. по прямой. Расстояния от установки светодальномера и отражателя над центром.
4. Пункт CIRK-1 был заложен в виде бетонной тумбы в 1980 г. на сопке Шивелуч. В 1990 на этой же сопке заложена брусчатая бетонная тумба на самой высокой точке сопки. Измерения и наблюдения выполняются с этого пункта.



**Рис. 3.** Схема измерения длин линий светодальномерами СГ-3 и Геодинетр 8 на Ключевском ГДП в период 1978-1984 гг.



**Рис. 4.** Схема измерения длин линий светодальномерами СГ-3 (линия KLUC — MALY) и СП-2 (все остальные линии) на Ключевском ГДП в период 1988-2007 гг.

**Таблица 3.** Наклонные расстояния, приведённые к центрам знаков (Дцц) на Ключевском ГДП в период 1988–2007 гг.

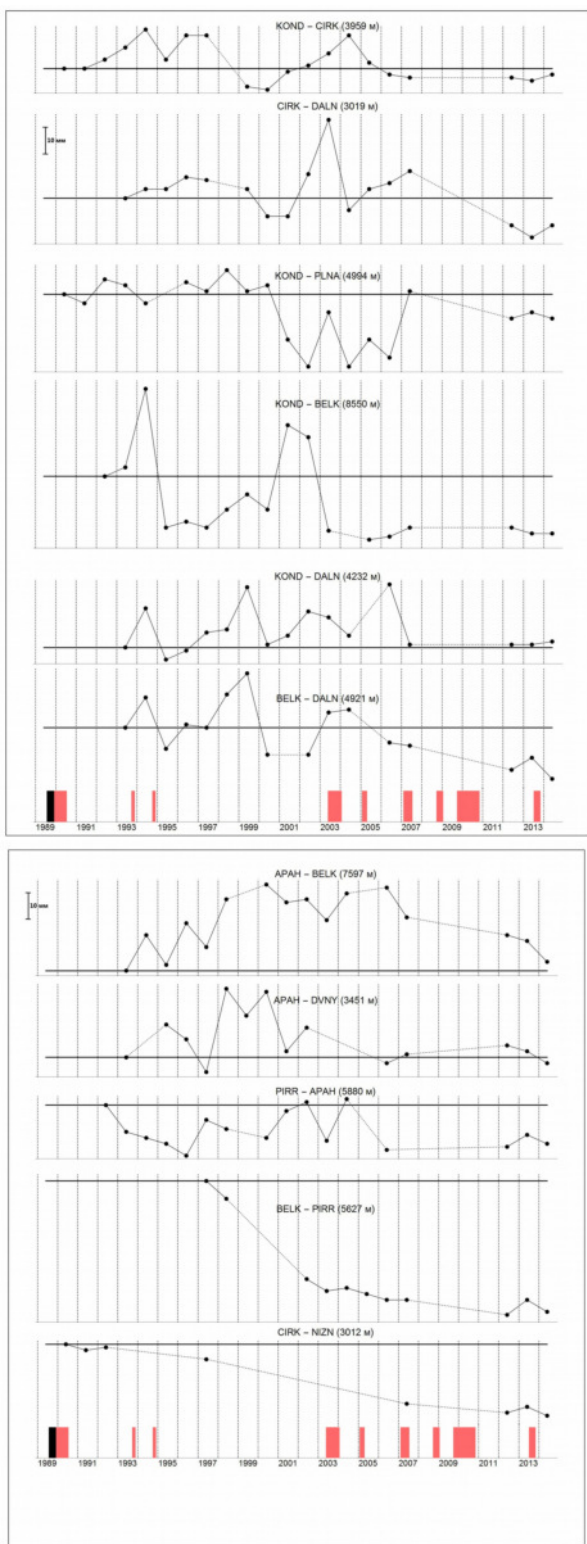
год определ.	название линий												
	KOND- CIRK	CIRK- DALN	KOND- BELK	KOND- PLNA	BELK- DALN	KOND- DALN	CIRK- NIZN	ZLNY- APAH	ZLNY- PIRR	APAH- BELK	APAH- DVNY	PIRR- APAH	PIRR- DVNY
1988	3929,774	3000,065					3041,382	3481,137					
1989	3929,785	3000,076	8550,181	4583,017*			3041,386	3481,154					
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	4327,576
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	5880,440	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	5880,443	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	5880,446	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	5880,444	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	5880,440	4327,560

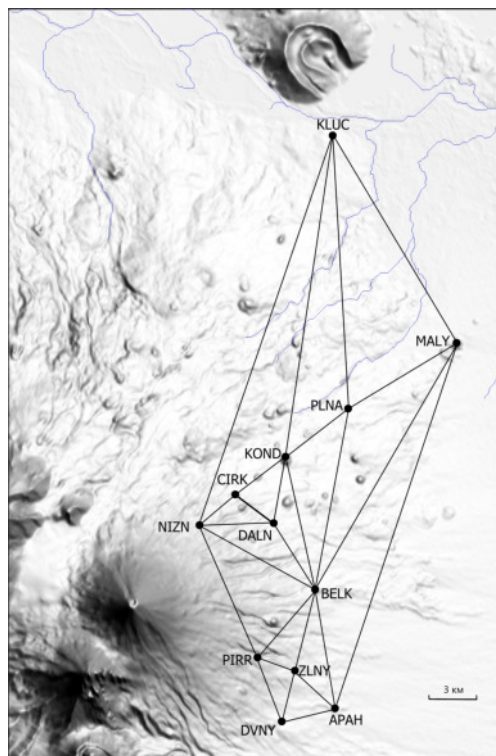
Год определ.	Название линий											
	KOND- NIZN	ZLNY-708	ZLNY- OTKR	ZLNY- STEL	KOND- SKLA	MALY- PLNA	KOND- KELL	MALY- KLUC	ZLNY- LAGR	BELK- PIRR	ZLNY- DVNY	ZLNY- BELK
1988				3613,280	4003,852		4426,449					
1989		2225,837	3416,637						7947,371			5261,567
1990		2225,845	3416,623						7947,327			5261,559
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

Применения к измерениям, выполненным в период 1988-2007гг. Пункт CIRK - это 2-ая на этой же Сопке, установлен в 1990г. и он принят в дальнейшем за основной. Пункт MALY - бетонный тур вблизи пункта государственной триангуляции с тем же названием. Пункт KELL - бетонный тур на той же сопке, где находится пункт гос.тр. с названием Подножье Келля. Они находятся по разные стороны от кратера. Пункт ОТКР - бетонный тур на конусе "S". На этом же конусе на северной стороне находится пункт гос. тр. с названием Открытый. Пункт STEL - пункт гос. тр. с названием Апахончич. Отражатель на нем был установлен на деревянном столике, куда был вынесен центр знака. Пункт 708 - грунтовый ре- пер, отражатель был установлен на штативе над маркой. Пункт LAGR - вбетонированный штатив СГ-3, утрачен во время изверже- ния 1993г. Пункты: PLNA, NIZN, SRDN, PIRR, ZLNY, APAH, DVNY, BELK - бетонные туры.

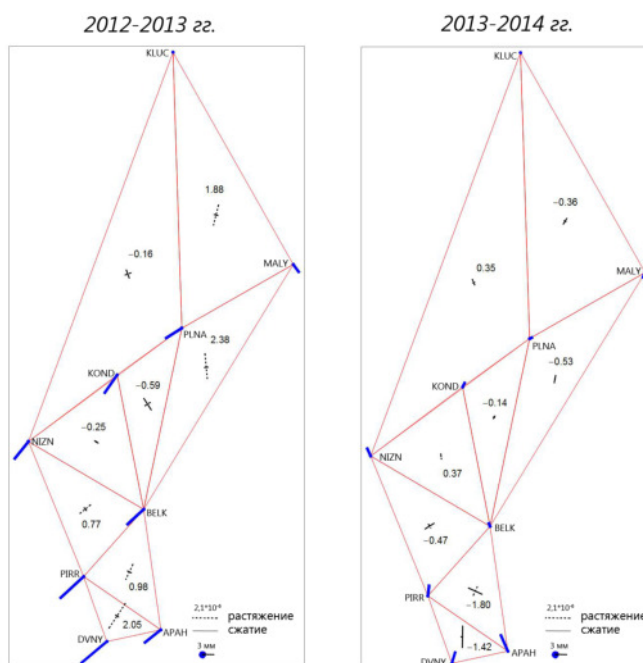




**Рис. 5.** Графики изменения наклонных расстояний. В нижней части рисунка показаны: залитым черным цветом — время извержения вулкана Ключевской с излиянием лавы; серым — время вершинных извержений [7].



**Рис. 6.** Схема установки спутниковых геодезических приемников на Ключевском ГДП в 2012 г. (залитые чёрные точки).



**Рис. 7.** Горизонтальные деформации земной поверхности на северо-восточном склоне вулкана Ключевской. Обозначения те же, что на рис. 2.

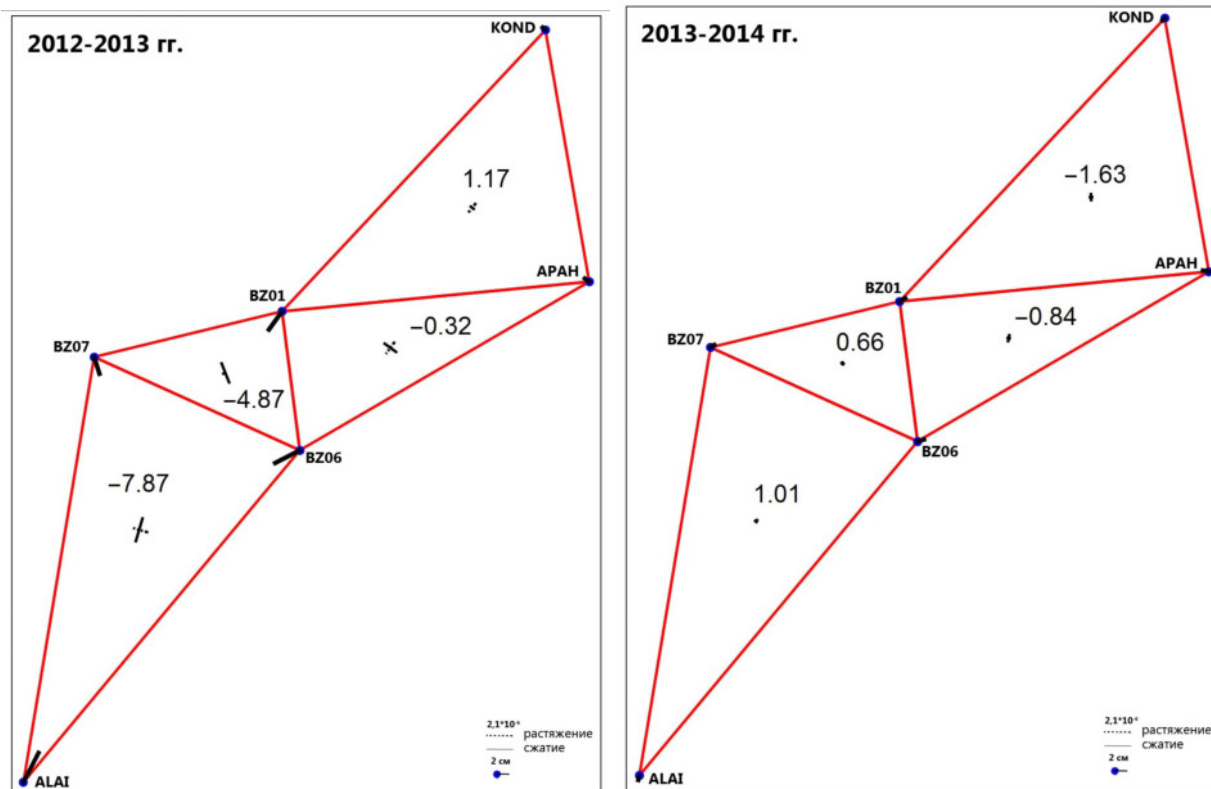


Рис. 8. Область распространения горизонтальных деформаций земной поверхности в связи с ТТИ – 2012–2013 гг. Обозначения те же, что на рис. 2.

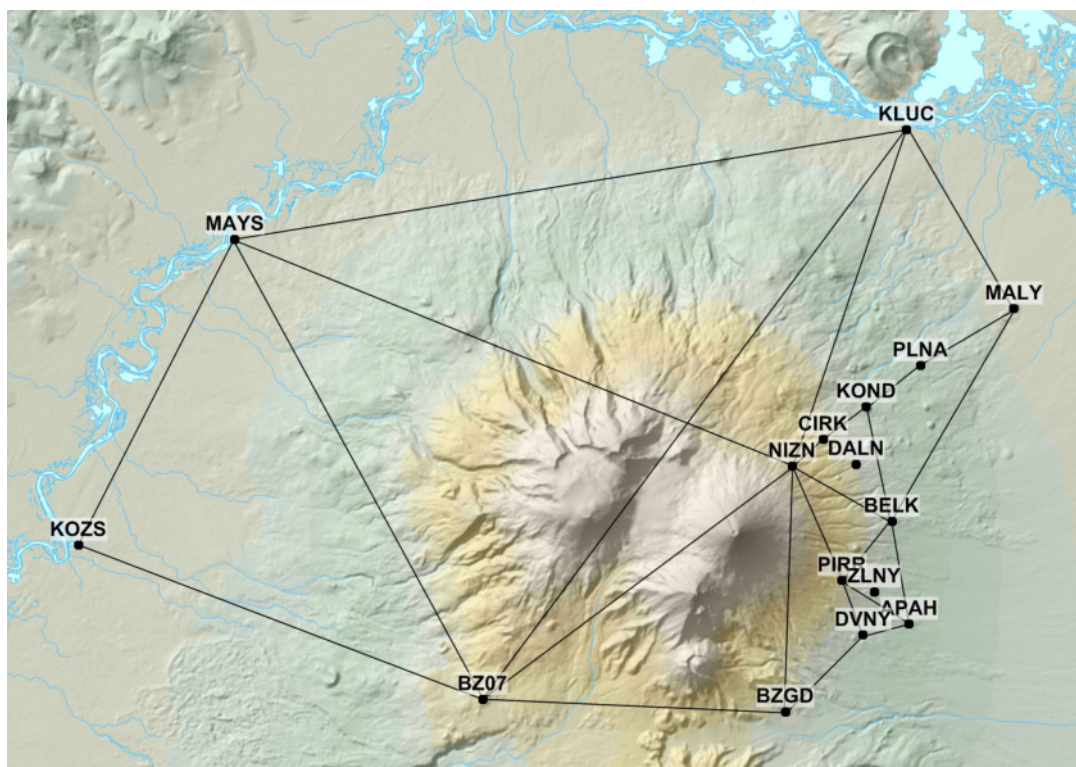


Рис. 9. Места установки спутниковых геодезических приемников на Ключевском ГДП в 2012–2014 гг. (чёрные заливные кружки).



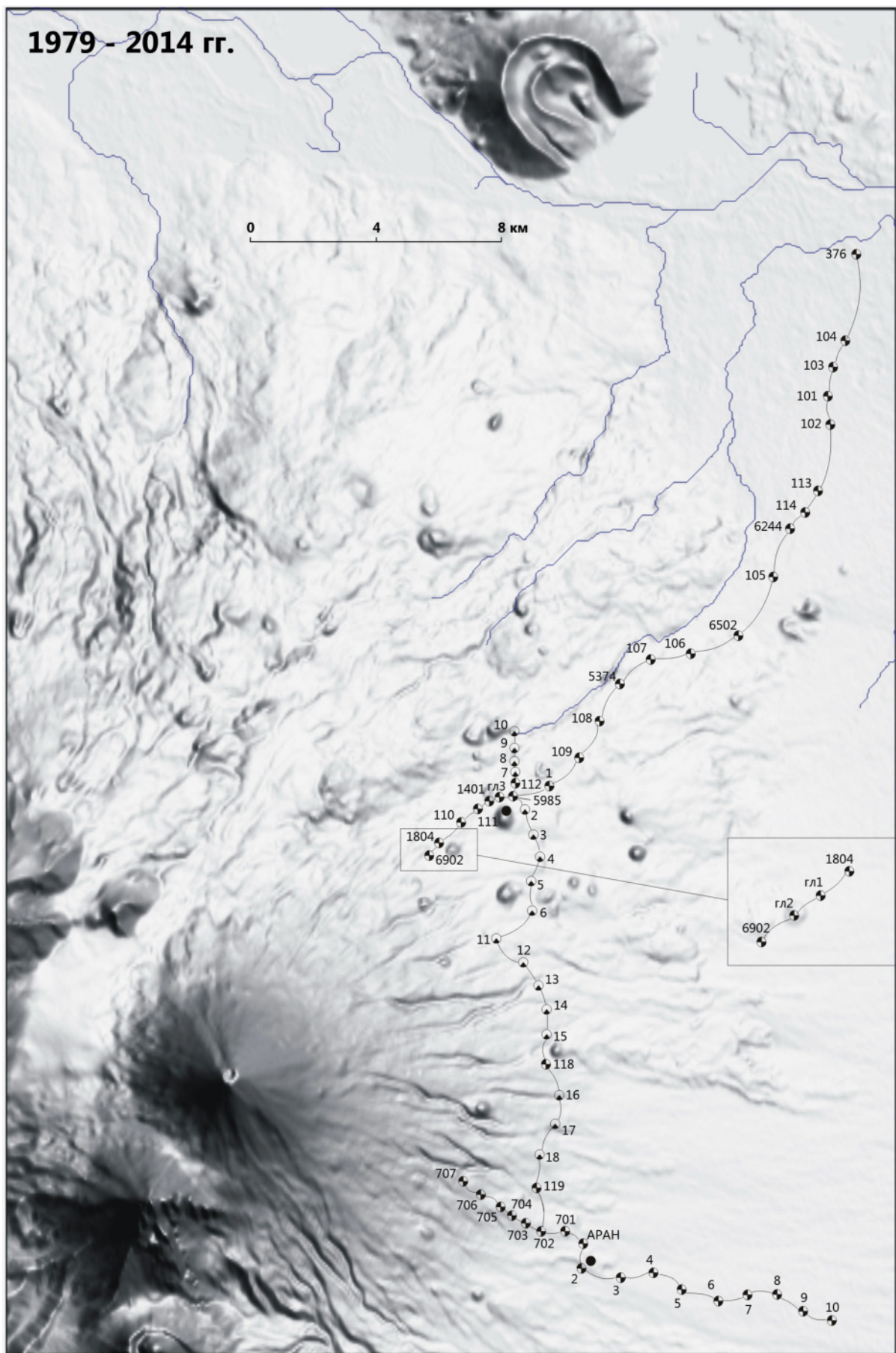
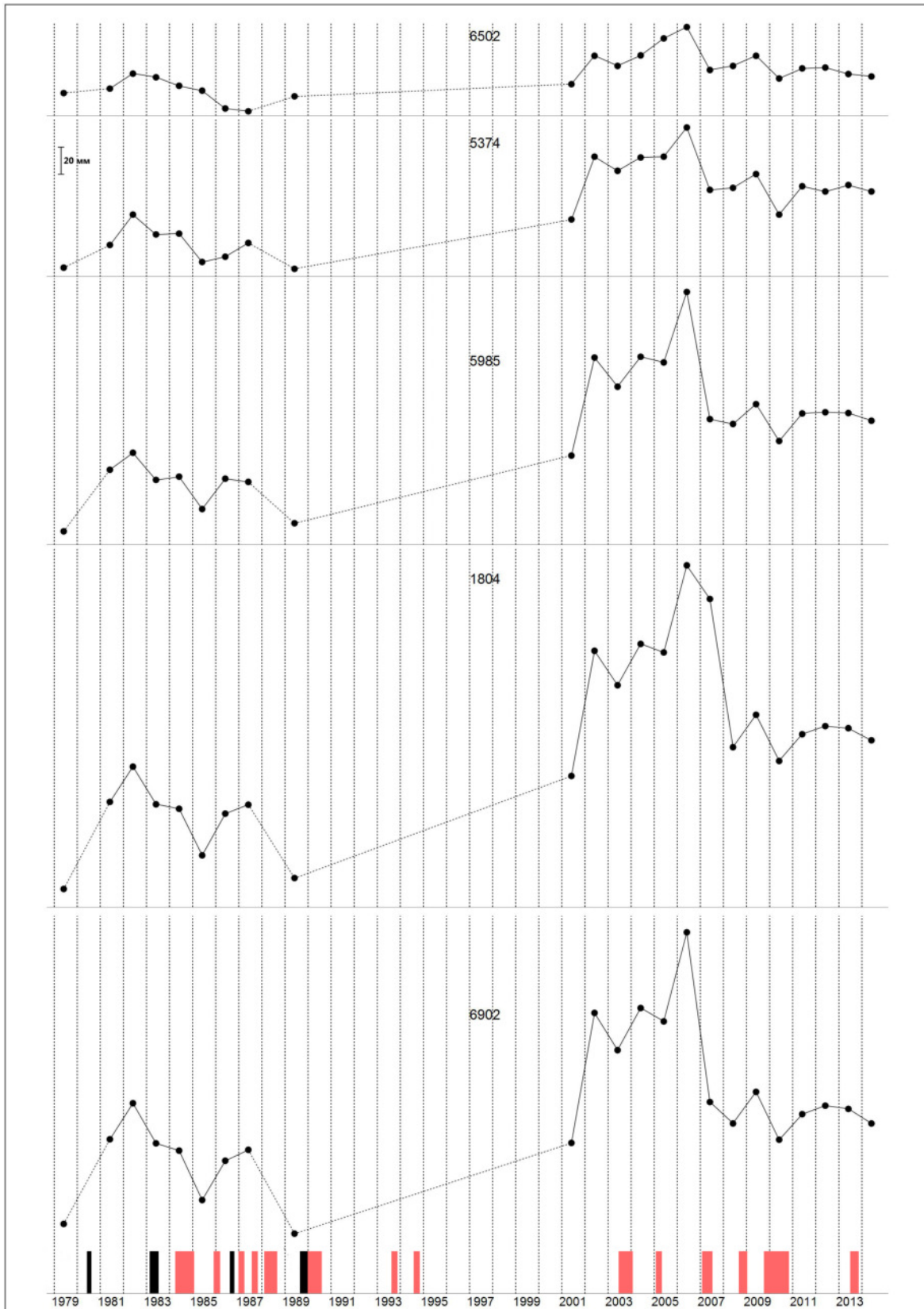


Рис. 10. Схема высокоточных нивелирных профилей, заложенных на Ключевском ГДП в 1978–1985 гг.



**Рис. 11.** Графики вертикальных движений реперов в период 1979–2014 гг. В нижней части рисунка показаны времена извержения вулкана Ключевской: черный залитый прямоугольник с излиянием лавы, серый прямоугольник – вершинные извержения без излияния лавы.





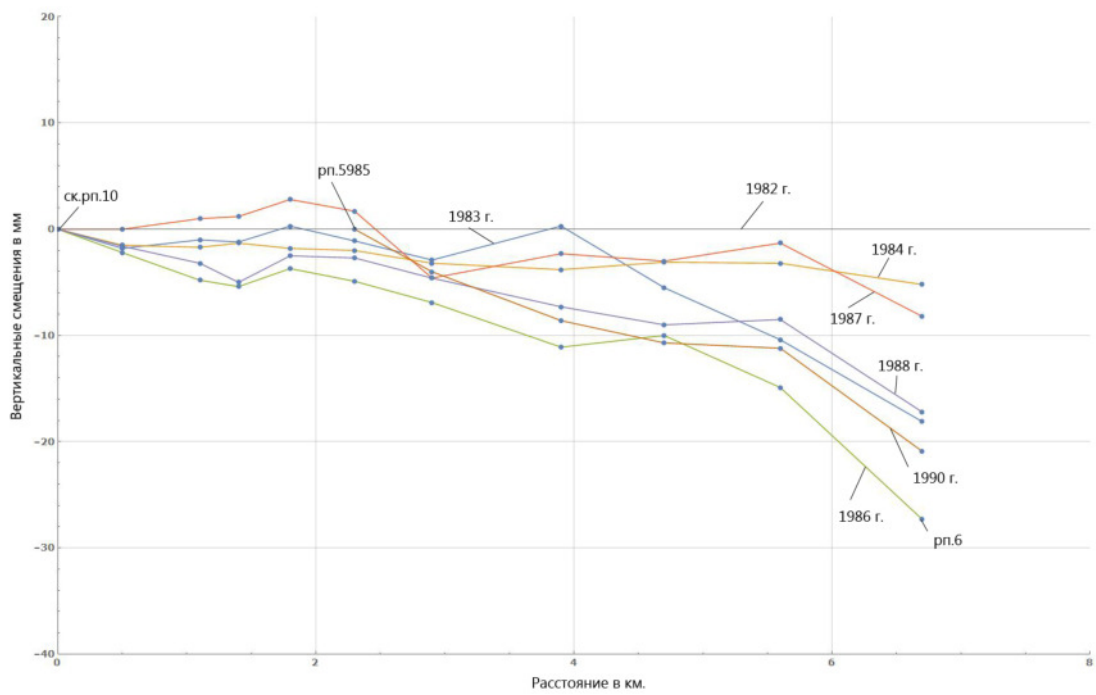


Рис. 14. Изменения уровня земной поверхности по нивелирному профилю Ск. рп. 10 – Ск. рп. 6 (рис. 10).

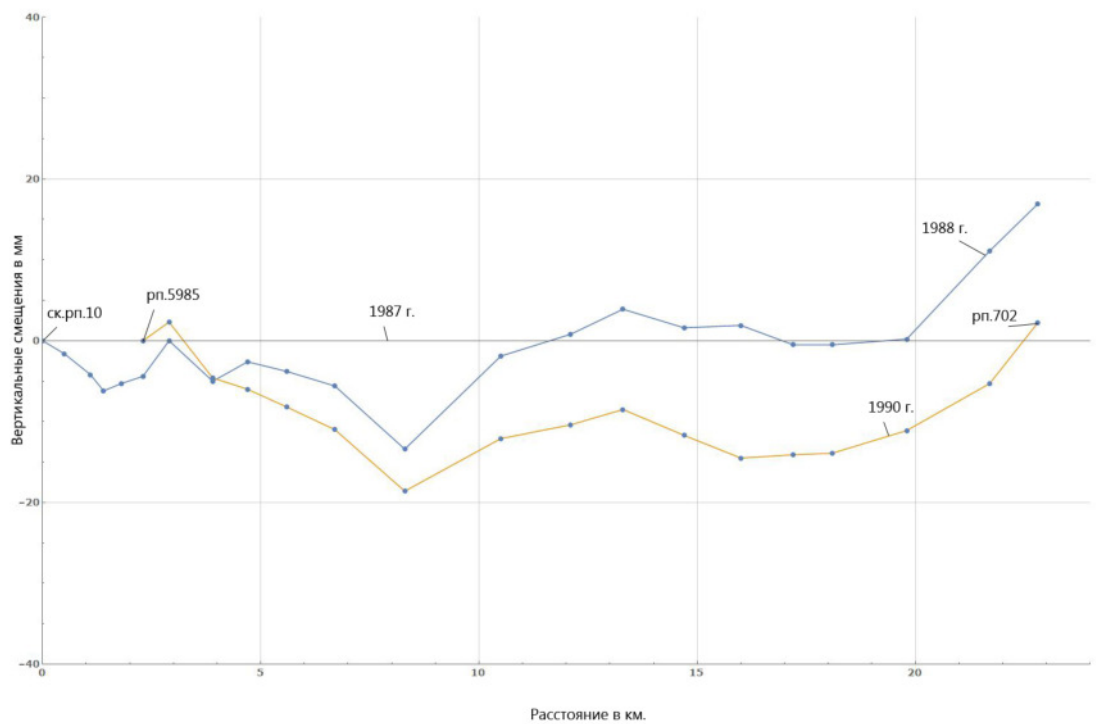


Рис. 15. Изменения уровня земной поверхности по нивелирному профилю Ск. рп. 10 – Гр. рп. 5985 – Гр. рп. 702 (рис. 10).











**Таблица 5.** Превышения между главными реперами, измеренные нивелированием II класса по профилю Гр. Рп. 113 — Гр. рп. 6902 в период 1979–2014 гг.

Год и месяц определений						
№ Реперов и длина секций (км.), Превышения 113-6244		6244-6502	6502-5374	5374-5985	5985-1804	1804-6902
	1,4	4,5	4,4	5	3,6	0,6
1979		157,9434	321,3634	237,6812	253,4595	43,4533
1981		157,9466	321,3766	237,7098	253,4780	43,4515
1982		157,9576	321,3878	237,6998	253,4916	43,4520
6,1983		157,9549	321,3760	237,6945	253,4840	43,4501
7,1984		157,9485	321,3832	237,6961	253,4782	43,4483
10,1984	40,0524	157,9450	321,3868	237,7056	253,4836	
6,1985	40,0529	157,9450	321,3658	237,6935	253,4678	43,4461
9,1985				237,7103	253,4800	43,4476
6,1986		157,9320	321,3828	237,7116	253,4760	43,4444
11,1986		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

**Таблица 6.** Превышения, измеренные нивелированием II класса по профилю Гр. Рп. «Хапица» – Гр. рп. 702 – Гр. рп. 707 в период 1985–1990 гг.

Тип и номер нивелирного знака	Расстояние между реперами, км	Год производства и превышения				
		1985 г.	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1990 г.
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						



2. Извержение, по-видимому, сопровождалось опусканием земной поверхности, так как отметки пунктов, расположенных на удалении от южного центра извержения на 7–8 км уменьшились к июлю 2013 г. на 19–27 мм по сравнению с отметками тех же пунктов в 2011 г. После прекращения излияния лавы летом 2013 г. наметилась обратная тенденция, т. е. деформации были упругими.

3. Площадная плоская деформация земной поверхности изучалась методом вычисления в каждом треугольнике дилатации (относительного увеличения площади треугольника), величин и направлений взаимно-перпендикулярных главных осей плоской деформации. Оси растяжения имели северо-восточное направление со значениями  $9 \cdot 10^{-6}$  в относительной мере. Векторы горизонтальных подвижек тех же пунктов, удалённых от мест извержений на 7–8 км, направлены в район прорыва магм по протяжённой питающей трещине. Величина и направление их определены при условии неподвижности одного из пунктов, удаленного от определяемых на 10–15 км. Длины векторов в пределах 3–5 см.

4. Пункты, расположенные на склонах конуса вулкана Ключевской на отметках выше 1600 м, медленно сползают вниз со скоростью первые сантиметры в год (измеренное максимальное значение 18 см в год). Причина — текучесть грунта, перемешанного со льдом, под действием силы тяжести. Отсюда следует — нет смысла закладывать геодезические знаки на склоне конуса вулкана Ключевской с целью изучения подвижек земной поверхности в связи с извержениями.

5. Изменения длин линий в окрестностях вулкана Ключевской в отдельных случаях превышают погрешности измерений ( $2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \text{ Д}$ ), 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.

6. Вертикальные движения земной поверхности вблизи вулкана Ключевской определялись нивелированием с погрешностью превышений  $\pm 1 \text{ мм} \cdot \sqrt{L}$ , где  $L$  — расстояние между реперами в км по двум радиальным к вулкану профилям и поперечному к ним. Наиболее длинный ряд наблюдений (1979–2014 гг.) выполнен по радиальному профилю северо-восточного направления протяжённостью 18,4 км. Замечено, что во время извержения с излиянием лавы происходит заметное опускание земной поверхности даже на расстоянии 24 км от вершины вулкана, и оно возрастает по мере приближения к ней и на расстоянии 11 км от вершины кратера составляет  $\sim 40$  мм. В целом изменения уровня земной поверхности знакопеременные, однако, наблюдается тренд графиков вертикальных движений реперов, показывающий воздымание земной поверхности

с увеличением его по мере приближения к вершине вулкана. С 1979 по 2014 г. подъём (воздымание) составил 11 см, а максимальная величина его в 2006 г. была 23,6 см при погрешности определения  $\pm 1$  см.

7. Горизонтальные смещения пунктов, расположенных на северо-восточном подножье вулкана Ключевской, определялись в период 2012–2014 гг. относительно пункта, находящегося в пос. Ключи на расстоянии 32 км от кратера вулкана методом GNSS технологии. Они за период 2012–2013 гг. оказались в пределах 6–10 мм и были направлены в сторону места трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.

### Список литературы

1. Антонович К. М., Карпик А. П., Клепиков А. Н. Спутниковый мониторинг земной поверхности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2004. № 1. С. 4–10.
2. Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. /Отв. ред. Федотов С. А., М: Наука. 1984. Гл. XIV. С. 472–513.
3. Гордеев Е. И., Муравьёв Я. Д., Самойленко С. Б. и др. Трещинное Толбачинское извержение в 2012–2013 гг. Первые результаты // ДАН. 2013. Том. 452. № 5. С. 562–566.
4. Двигало В. Н., Свирид И. Ю., Шевченко А. В. Первые количественные оценки параметров трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 3–11.
5. 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.
6. Жаринов Н. А., Еремеев Н. Н. Деформации земной поверхности Ключевского вулкана, предвалявшие и сопровождавшие извержение предсказанное в 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 88–97.
7. 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.
8. Кафтан В. И., Докукин П. А. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений // Геодезия и картография. 2007. № 9. С. 18–22.
9. Кириенко А. П. Результаты определения горизонтальных деформаций земной поверхности в районе Большого Толбачинского извержения по материалам угловых и линейных измерений 1971, 1976 и 1977 гг. // Бюллетень вулканологических станций. 1979. № 56. С. 63–66.
10. 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 // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Выпуск 21. С. 147–151.
11. Магуськин М. А., Левин В. Е., Бахтияров 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.

12. Самойленко С. Б., Мельников Д. В., Магуськин М. А., Овсянников А. А. Начало нового трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Выпуск 20. С. 20–22.
13. Серебрякова Л. И. Методика дифференциального описания деформаций и повторные спутниковые определения // Геодезия и картография. 2014. № 10. С. 47–50.
14. Федотов С. А., Энман В. Б., Никитенко Ю. П., Магуськин М. А. и др. Геодезические исследования // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. / Отв. ред. Федотов С. А.. М: Наука. 1984. Гл. XIV. С. 472–513.
15. 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.
16. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об её извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
17. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Горельчик В. И. Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 3–42.