

УДК 551.24+528.2/3

ФЕДОТОВ С. А., МАГУСЬКИН М. А., ЛЕВИН В. Е.,
ЖАРИНОВ Н. А., БАХТИАРОВ В. Ф., КИРИЕНКО А. П.

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАМЧАТКИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

DEFORMATIONS OF THE EARTH'S SURFACE ON THE EASTERN COAST OF KAMCHATKA AND THEIR RELATION WITH SEISMICITY, by Fedotov S. A., Maguskin M. A., Levin V. E., Zharinov N. A., Bakhtiarov V. F., and Kirienko A. P. This paper offers an analysis of repeated geodetic measurements of the horizontal and vertical deformations of the Earth's surface on the Avacha Bay coast and on the northern coast of Kamchatka Bay. During the period 1979—1986 slow elastic horizontal deformations of the order of $(1-3) \cdot 10^{-6}$ and rapid elastic deformations of the order of $(3-4) \cdot 10^{-6}$ within an accuracy of $(0.5-0.8) \cdot 10^{-6}$ were detected by geodimeter measurements of lines 10—50 km long radiating from the summit of Mount Mishennaya in Petropavlovsk—Kamchatskii. According to levelling data the foot of Avacha Volcano exhibited a relative subsidence. All the large earthquakes ($M=7.5$ and 7.8) in the northern part of Avacha Bay in 1971—1986 were accompanied by residual vertical deformations of the Earth's surface amounting to $5 \cdot 10^{-6}$. A uniform inclination of the Kamchatsky Peninsula predominantly to the north commences long before the next large earthquake. Immediately after the earthquake the Kamchatsky Peninsula exhibits inclination to the south and south-west at $(3-5) \cdot 10^{-6}$, i. e. in the opposite direction.

(Received February 16, 1987)

Institute of Volcanology, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Камчатка — одно из мест, где возможно эффективное изучение деформаций земной поверхности в связи с сейсмичностью и извержениями вулканов, так как этот регион вместе с Курильскими островами один из самых сейсмических активных в мире: здесь расположено 12% наземных вулканов мира, действовавших в историческое время.

Известно, что процесс подготовки землетрясений и извержений вулканов и сами эти явления сопровождаются деформациями земной поверхности. Для изучения величины и скорости изменения этих деформаций в пространстве и во времени выполняются повторные геодезические измерения. На Камчатке эти работы начаты в 60-х годах.

В начале 70-х годов Институтом вулканологии ДВНЦ АН СССР и предприятием ГУГК была разработана долгосрочная программа геодезических исследований движений земной коры на Камчатке, содержащая следующие основные задачи: получение количественных характеристик деформаций поверхности земли, необходимых для изучения строения, физических свойств земной коры, геодинамики, сейсмичности и вулканизма; детальное изучение деформаций, связанных с сильными землетрясениями и вулканическими извержениями, и поиск геодезических предвестников этих явлений [14].

Выполнение этой программы в широком масштабе началось в 1974 г. силами предприятия ГУГК и Института вулканологии ДВНЦ АН СССР. С тех пор предприятием ГУГК выполнены на Камчатке линейно-угловые измерения на восьми локальных полигонах (рис. 1). На

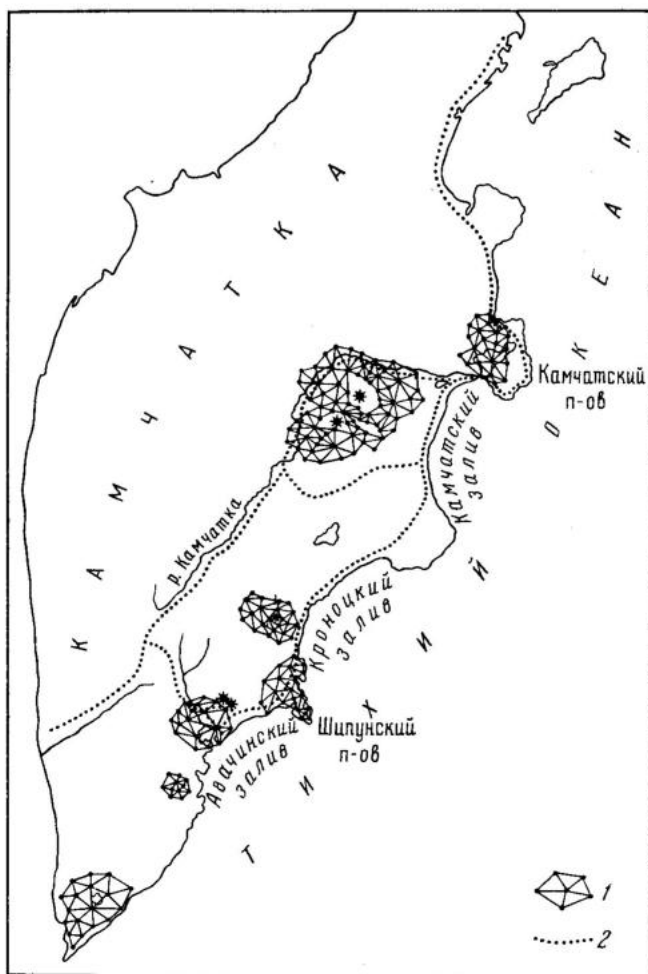


Рис. 1. Схема геодезических измерений деформаций земной поверхности на Камчатке (работы предприятия ГУГК). 1 — линейно-угловые сети; 2 — трассы нивелирования I класса

четыре из них наблюдения повторяются через два-три года. По данным повторных нивелирований по трассам протяженностью более 2 тыс. км получены сведения о суммарных вертикальных подвижках примерно за 10 лет (первое нивелирование выполнено в 1966—1971 гг., второе — в 1977—1981 гг.). Основные результаты работ предприятия ГУГК, отражающие движения земной поверхности на площадях до 4000 км² в отдельных районах Камчатки и вдоль протяженных (сотни километров) нивелирных трасс, опубликованы в [3, 4, 16].

Геодезические работы, выполненные Институтом вулканологии с начала 70-х годов по 1986 г., показаны на рис. 2. Они проводились в основном на полигонах сравнительно небольших размеров, расположенных в наиболее подвижных участках на побережье Авачинского и Камчатского заливов, а также на вулканах Ключевской, Безымянный, Толбачинский, Карымский, Авачинский, Ксудач. Эти работы состояли из повторных светодальномерных измерений, нивелирований и наклономерных наблюдений. На побережье Камчатского залива в районе р. Быстрая измерения ведутся совместно с Лабораторией динамической геодезии Института физики Земли (ИФЗ) АН СССР. Эта же Лаборатория выполнила в 1971 г. первое нивелирование на мысе Камчатский (см. рис. 2).

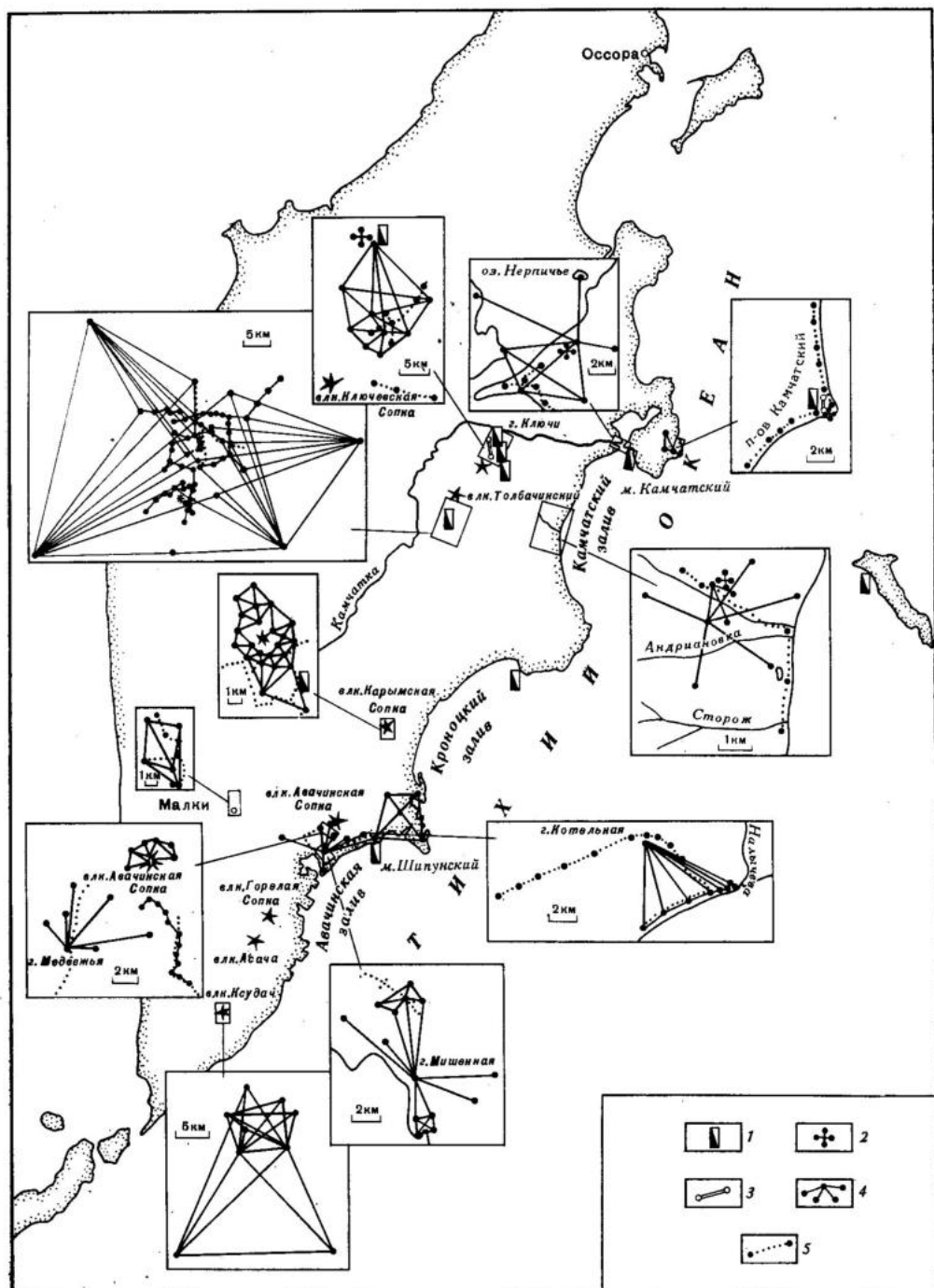


Рис. 2. Схема геодезических измерений деформаций земной поверхности на Камчатке (работы Института вулканологии ДВНЦ АН СССР). 1 — пункты непрерывных наклономерных наблюдений; 2 — нивелирные наклономерные площадки; 3 — гидростатические наклономеры; 4 — линии, вдоль которых светодальномерами измеряются горизонтальные смещения; 5 — трассы нивелирования I класса (закладка реперов и первое нивелирование на п-ове Камчатский выполнены Ин-том физики Земли АН СССР. Измерение линий на побережье Камчатского залива в районе р. Быстрая выполнено совместно с ИФЗ)

К настоящему моменту получены данные о деформациях земной поверхности в различных подвижных районах Восточной Камчатки, которые можно рассматривать в связи с сейсмическими и вулканическими событиями. Результаты исследований по каждому району заслуживают отдельных публикаций, отчасти уже сделанных. Изложить все имеющиеся новые материалы в одной статье невозможно из-за ограниченности ее объема, поэтому в данном сообщении приведены отдельные результаты повторных геодезических измерений, выполненных Институтом вулканологии на побережье Авачинского залива и на п-ове Камчатский. К главным, ранее опубликованным работам о деформациях земной поверхности в других районах Камчатки или в другие периоды времени относятся, например, результаты комплексных геодезических исследований Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—1976 гг., приведенные в [15], данные о деформациях земной поверхности вблизи Ключевского вулкана [2], на вулкане Карымский [8], на вулкане Ксудач [10]. Особенности и некоторые закономерности горизонтальных и вертикальных деформаций вблизи г. Петропавловска-Камчатского, которые были получены с привлечением главным образом материалов предприятия ГУГК, изложены в работах [5, 18].

Началу систематического изучения деформаций земной поверхности на побережье Авачинского залива в связи с сейсмичностью этого района и расположением здесь двух крупных городов Камчатки и других народнохозяйственных объектов предшествовал ряд работ предварительного характера.

Институтом вулканологии ДВНЦ АН СССР первые повторные геодезические измерения были начаты в 1963 г. на нивелирном профиле Авача-I длиной 16 км, у подножия Авачинского вулкана. В 1966 г. этот профиль был продлен по Елизовской Сухой речке до Петропавловского футштока.

Предприятием ГУГК в 1975 г. был проложен второй нивелирный профиль Авача-II от футштока вдоль Халактырской Сухой речки до подножия Авачинского вулкана. Измерения на нем были повторены в 1980 и 1982 гг.: в 1974—1984 гг. выполнены четыре цикла измерений в линейно-угловой сети петропавловского геодинимического полигона, в 1975 и 1981 гг. проведены аналогичные измерения на Шипунском геополигоне; в 1977 г. выполнено нивелирование I класса вдоль побережья Авачинского залива по линии II класса Петропавловск — Усть-Камчатск, проложенной в 1966—1970 гг.

Все вышеуказанные измерения сделаны в период, когда в Авачинском заливе и на его побережье происходили очень заметные события (рис. 3): 24.XI 1971 г. под Авачинским заливом на глубине 100 км произошло сильное землетрясение с магнитудой $M=7,2$; в марте-апреле 1983 г. под потухшим вулканом Асача, в 90 км к югу от г. Петропавловска наблюдался большой асачинский рой землетрясений, где максимальный класс землетрясений $K_{S_{1,2}}^{\Phi_{08}}$ по С. А. Федотову (в дальнейшем — просто К) был равен 11,8, $M=4,0$; с июня 1980 г. по 3 июля 1981 г. происходило эксплозивное извержение вулкана Горелый, расположенного в 45 км к ЮЗ от Авачинской бухты. Аналогичное извержение этого вулкана началось 3 сентября 1984 г. и продолжалось с перерывами более года.

Подробное рассмотрение повторных геодезических измерений на больших площадях на побережье Авачинского залива показало, что геополигоны Петропавловский и Шипунский, линии нивелирования Петропавловск — п-ов Шипунский, Авача-I и Авача-II оказались весьма информативными. Полученные результаты детально рассматривались в работах [5, 16, 18]. Вертикальные деформации на отдельных участках вдоль нивелирного профиля Авача-I ($-20 \cdot 10^{-6}$ в период 1967—1971 гг.; $10 \cdot 10^{-6}$ в 1966—1972 гг.; $7 \cdot 10^{-6}$ в 1972—1975 гг.), вероятно,

ни к сильным землетрясениям. Кроме того, оказалось, что после землетрясения 19.XII.1968 г. амплитуда смещений по разломам уменьшается от Авачинского вулкана к городу, а после землетрясения 24.XI.1971 г., наоборот, от Петропавловска к Авачинскому вулкану [18]. В то же время усиление сейсмической активности Авачинской группы вулканов в 1973—1975 гг. не вызвало заметных относительных вертикальных деформаций района, прилегающего к вулкану [18], но общий относительный подъем обширного участка на 20—30 мм, начавшийся в 35 км от вулкана в период 1972—1975 гг., все же, возможно, связан с этими событиями.

Растяжение земной поверхности на Петропавловском полигоне за 1974—1980 гг. (средняя положительная дилатация $5 \cdot 10^{-6}$) произошло, когда сейсмическая активность на Камчатке была относительно низкой, а сжатие в период 1981, 1982 гг. (средняя отрицательная дилатация $3 \cdot 10^{-6}$) совпало по времени с повышением сейсмической активности. Замечено, что горизонтальным деформациям растяжения соответствует относительно ступенчатое опускание земной поверхности и, наоборот, горизонтальным деформациям сжатия соответствует относительный подъем или гофрирование земной поверхности [5].

С учетом результатов перечисленных выше измерений, геологической и геофизической изученности с 1984 г. вблизи г. Петропавловска-Камчатского начаты работы по размещению специальных геодезических сетей со сторонами 1—3 км и нивелирных профилей длиной до 4 км. Эти участки названы деформационными площадками и предназначены для выполнения на них частых измерений с целью поиска средне- и краткосрочных предвестников сильных ($M > 7$) землетрясений. Однако из-за сравнительно небольшой продолжительности рядов измерений приводить сейчас здесь результаты по этим площадкам преждевременно. Остановимся на результатах более длительных измерений из обсерватории Мишенная, на полигонах Налычева, Авача-II и на п-ове Камчатский.

Горизонтальные деформации земной поверхности на побережье Авачинского залива по данным светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная

Для обнаружения геодезических предвестников сильных землетрясений и извержений вулканов, опасных для Петропавловска-Камчатского, Институт вулканологии с 1979 г. ведет круглогодично, с частотой 1—2 раза в неделю, измерения горизонтальных деформаций земной поверхности из обсерватории Мишенная. Эти данные необходимы и для изучения строения и физических свойств земной коры.

Обсерватория Мишенная расположена в Петропавловске-Камчатском, на вершине одноименной горы и представляет собой круглую бетонную башню с вращающимся куполом, под которым установлен комплекс измерительной аппаратуры. Со столика, высота которого под грунтовым геодезическим центром 6 м, светодальномером СГ-3 или Геодиметром-8 измеряются 10 линий длиной от 10 до 50 км суточными сериями. Светодальномер на столике устанавливается в одно и то же место, а центрировка столика над центром проверяется систематически с точностью 1—2 мм. Отражатели установлены на железобетонных пилонах с помощью устройства принудительного центрирования. Пилоны заложены на глубину 2—2,5 м и выступают над поверхностью земли на 0,7—1,3 м [1]. Методика измерения линий суточными сериями и учета влияния атмосферы описаны в работе [6]. Суточная серия — это 6—8 измерений каждой линии, равномерно распределенных в течение суток. Для каждой линии нами приняты наклонные дальности как средние по нескольким первоначальным наблюдениям. Все последующие измерения

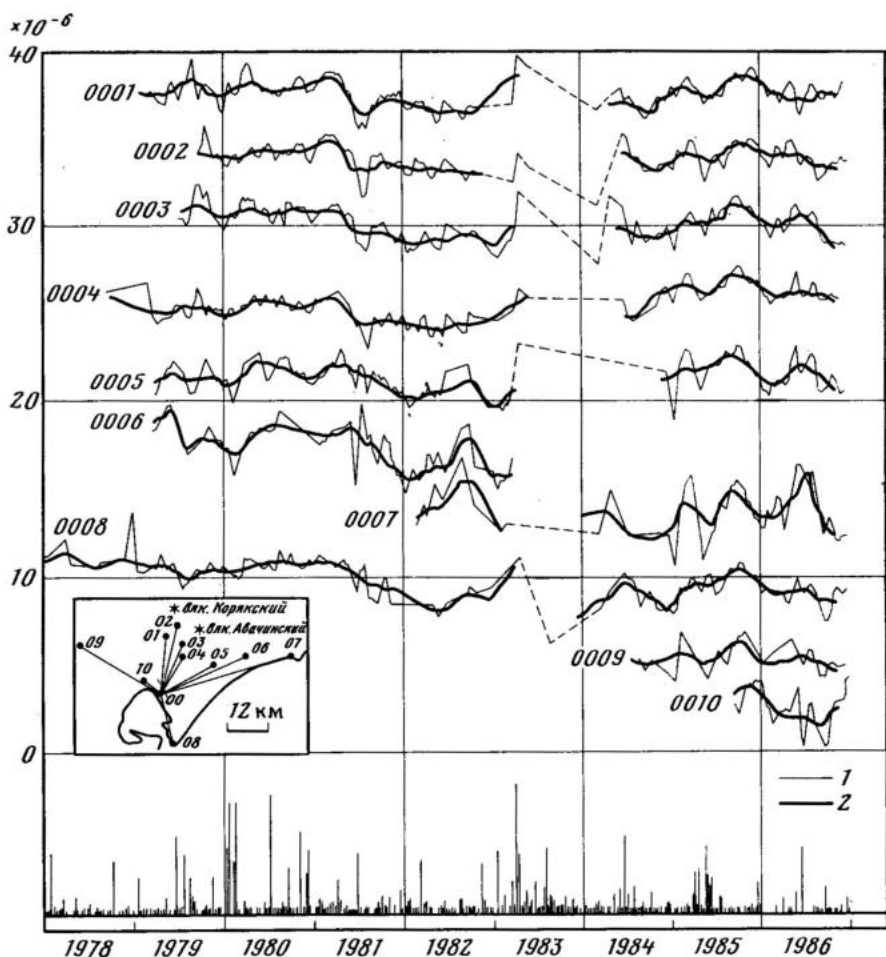


Рис. 4. Горизонтальные деформации вдоль линий, измеренных из обсерватории Мишенная в период 1978—1986 гг. Графики отфильтрованы окнами: 1—30 дней, 2—120 дней. На врезке показана схема расположения измеряемых линий. Внизу нанесены землетрясения (пояснения в тексте)

рассматриваются как отклонения от этой принятой величины, нормированные к длине измеряемой линии. Принятые расстояния, превышения и азимуты линий приведены в таблице.

Результаты измерений с 1978 г., отфильтрованные 30- и 120-дневными окнами, представлены на рис. 4. Процесс фильтрации заключался в следующем: середина окна совмещалась с фильтруемой точкой и последней приписывалось значение среднего из всех попавших в окно точек. Такой способ был наиболее приемлемым для существенно неоднородного ряда наших измерений; при плохом заполнении окна были возможны искажения.

При общем рассмотрении результатов очевиден возвратный характер графиков изменений длин линий, что свидетельствует об упругих деформациях земной поверхности на территории всего полигона. Однако были периоды, когда горизонтальные деформации были однообразны. Например, хорошо видно общее сжатие всего полигона в начале 1981 и в конце 1985 г. Укорочение всех линий на величину $1-3 \cdot 10^{-6}$, в среднем весьма плавное, длилось 7—10 мес. Этот факт нельзя объяснить приборным или атмосферным шумом. За время наблюдений, начиная с 1978 г., в Камчатском регионе, в радиусе 500 км от полигона,

**Некоторые сведения о линиях, измеренных из обсерватории
Мишенная**

Линия	Наклонная дальность, м	Превышение относительно Мишенной, м	Азимут
00—01	21494,9331	232,6	6,71
00—02	25520,740	678,1	14,11
00—03	19690,184	528,0	24,91
00—04	15869,988	105,1	30,42
00—05	22384,631	—94,1	61,43
00—06	33814,487	—250,9	65,79
00—07	49707,944	—310,3	73,69
00—08	17760,877	—261,1	165,30
00—09	33536,710	715,8	301,71
00—10	7471,040	—308,5	309,47

не произошло землетрясений более 16 класса ($M \geq 7,6$). В 1980—1986 гг. отмечен ряд событий 13—14 классов на расстоянии 100—150 км от полигона (см. рис. 3). Все остальные землетрясения значительно слабее ощущались в районе полигона. Поэтому нам представляется целесообразным сопоставить ход горизонтальных деформаций с ходом изменения некоторой величины U , пропорциональной энергии землетрясения K и обратно пропорциональной расстоянию R до гипоцентра от центра полигона. В нижней части рис. 4 вертикальными черточками отмечены землетрясения (данные бюллетеня Камчатского полигона по прогнозу землетрясений и извержений вулканов). Высота черточки соответствует величине $U = 10^{k/a}/R^b$, в некотором масштабе для $a=2$, $b=3$. Явно прослеживается спад относительной (по отношению к обсерватории Мишенная) сейсмической активности в 1981, 1982 и 1985, 1986 гг. В это же время происходит общее сжатие по всему полигону на величину $1-3 \cdot 10^{-6}$. Следовательно, увеличению сейсмической активности предшествует сжатие полигона. По-видимому, изменение длин линий — это результат суммарного воздействия сейсмических событий.

Итак, светодальномерные измерения из обсерватории Мишенная показали:

1) в период 1979—1986 гг. наблюдались медленные горизонтальные деформации земной поверхности на побережье Авачинского залива порядка $1-3 \cdot 10^{-6}$ и быстрые упругие деформации порядка $3-4 \cdot 10^{-6}$ при точности измерений $0,5-1,0 \cdot 10^{-6}$.

2) общий временной ход изменений длин линий хорошо коррелирует с величиной U , посредством которой можно оценить деформации исследуемого полигона от удаленного землетрясения.

В заключение следует отметить, что отсутствие сильных сейсмических событий в Авачинском заливе ($M \geq 7$) за рассматриваемый период не позволяет нам уверенно говорить о характере возможных предвестников таких землетрясений; можно лишь предположить, что это будет деформация сжатия более $3 \cdot 10^{-6}$.

С целью поиска геодезических предвестников сильных землетрясений, происходящих в Авачинском заливе, Советом по прогнозу землетрясений и извержений вулканов Института вулканологии было решено расширить геодезические измерения на побережье.

**Вертикальные и горизонтальные деформации
земной поверхности на полигоне Налычева**

Полигон Налычева расположен в районе горы Котельная и устья р. Налычева на северо-восточном побережье Авачинского залива (рис. 5, б). Выбор этого района для частых и детальных измерений составля-

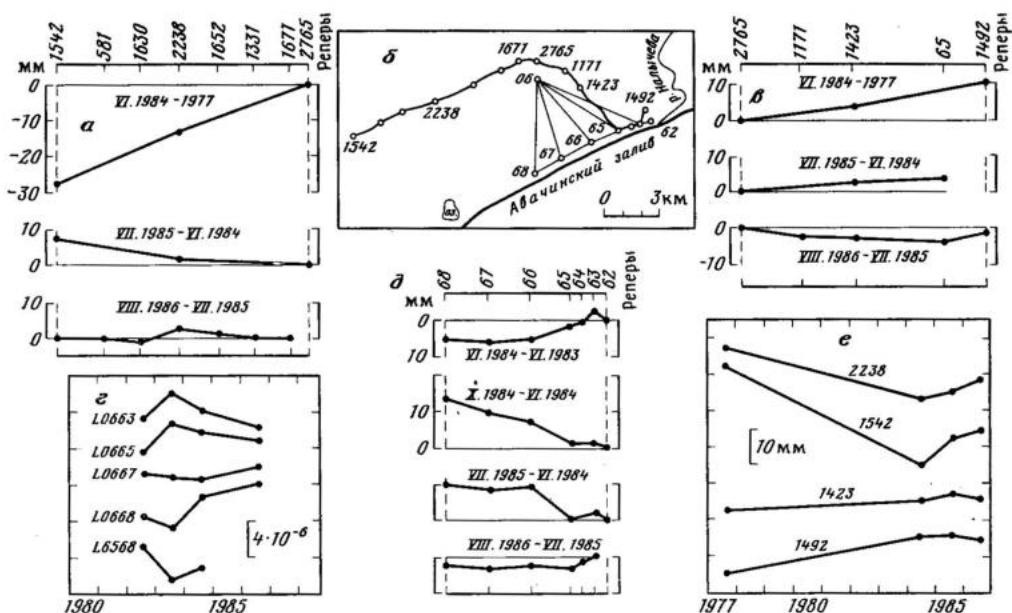


Рис. 5. Повторные геодезические измерения на полигоне Налычева; а — вертикальные смещения вдоль профиля 2765—1542; б — схема измерений; в — вертикальные смещения вдоль профиля 2765—1492; г — горизонтальные деформации вдоль отдельных линий; д — вертикальные смещения вдоль профиля 62—68; е — изменения отметок реперов относительно репера 2765

ющих деформаций земной поверхности в связи с поиском предвестников сильных землетрясений в Авачинском заливе был сделан на основании следующих данных: длины линий, измеряемых из обсерватории Мишенная на точки 05, 06, 07, расположенных в районе полигона Налычева, сравнительно сильно изменяются (см. рис. 4); по данным нивелирований в 1967 и 1977 гг., в этом районе были выявлены участки, где вертикальные подвижки реперов оказались выше погрешностей их определения в 2—3 раза [3]; данные о тектоническом строении этого района по результатам геологических, аэромагнитных и гравиметрических работ [11, 12] свидетельствуют о наличии здесь разломной зоны, перпендикулярной к глубоководному Курило-Камчатскому желобу, которая может быть местом концентрации напряжений в земной коре и одним из индикаторов сейсмического процесса в Авачинском заливе.

Геодезические работы проводились здесь ежегодно в летне-осенний период. Инструменты устанавливались на железобетонных тумбах с помощью устройств принудительного центрирования. Линии до 1 км измерялись светодальномером ДК-001, более 1 км — светодальномером СГ-3; ошибка измерения линий $1,5\text{--}2,5 \cdot 10^{-6}$. Вертикальные подвижки определялись нивелированием I класса с погрешностью не более $0,5 \cdot 10^{-6}$. Результаты всех измерений представлены на рис. 5. Судя по изменениям длин линий (см. рис. 5, г), здесь наметилась тенденция сжатия по направлению СВ, а по направлению СЗ — растяжения, но следует оговорить, что изменения близки к погрешностям измерений.

Нивелирные данные представлены по трем профилям: от репера 2765 в юго-западном направлении до репера 1542 (см. рис. 5, а), от этого же репера (2765) в сторону океана до репера 1492 (см. рис. 5, в) и от репера 62 в устье р. Налычева до репера 68 вдоль береговой полосы (см. рис. 5, д). Из данных по профилю 2765—1492 следует, что в период с 1977 по 1985 г. происходило относительное поднятие береговой полосы со скоростью около 2 мм/год; земная поверхность на этом участке вела себя как единое целое, при этом ее наклон к северо-запа-

ду за восемь лет составил величину 0,2 с дуги. По геоморфологическим данным, этот участок суши в четвертичное время поднимался со скоростью 1,6–1,7 мм/год [9]. Однако наблюдения уже в августе 1986 г. обнаружили опускание береговой полосы. Время смены знака движений неизвестно, но если иметь в виду смену знаков горизонтальных деформаций на побережье Авачинского залива по наблюдениям из обсерватории Мишенная (см. рис. 4), то она произошла во второй половине 1985 г. Зафиксированный нами относительный подъем береговой полосы, по-видимому, результат суммарного воздействия сейсмических событий, происшедших в фокальном слое напротив Авачинского залива в 1980–1985 гг. Количество их в этот период было значительно больше, чем в предыдущие пять лет. Годом наиболее выраженного сейсмического затишья на Камчатке за последние годы был 1977-й. В конце 1985 г. сейсмичность в районе Авачинского залива снова пошла на убыль.

Графики на рис. 5, а и б показывают относительные вертикальные движения по двум параллельным профилям. Если рассматривать одни и те же периоды, то качественно они одинаковы, профили расположены, по-видимому, в одних и тех же геологических условиях и на одном блоке земной коры. За семь лет, с 1977 по 1984 гг., весь 12-километровый участок 2765–1542 наклонился как единый блок на 0,5 с дуги в юго-западную сторону. Скорость относительных вертикальных подвижек составляла 4 мм/год. В 1985 г. направление наклона изменилось на обратное, но наблюдения в августе 1986 г. показали относительную стабильность этого участка земной поверхности.

На рис. 5, в приведены изменения отметок отдельных реперов относительно репера 2765. В точке «репер 2765» в период с 1977 по 1984 г. суммарный наклон земной поверхности был направлен на СЗ, далее он имел направление на СВ, а по данным измерений в конце 1986 г. направление наклона стало юго-восточным.

По работам, проведенным на полигоне Налычево в течение четырех полевых сезонов, можно сделать следующее заключение.

Геодезические измерения выполняются на тектонически активном участке, где измеренные горизонтальные и вертикальные подвижки превышают ошибки определения соответственно в 2 и 5 раз.

Продолжение здесь комплексных измерений позволит, по нашему мнению, выявить наиболее подвижные участки, и в дальнейшем создать на них деформационные площадки по комплексным геодезическим измерениям для изучения геодинамики и поиска предвестников сильных землетрясений.

Вертикальные и горизонтальные деформации земной поверхности вблизи Авачинского вулкана (полигоны Медвежка, Авача-II)

О вертикальных движениях земной поверхности вблизи Авачинского вулкана опубликован ряд работ. Одни из наиболее полных — это работы [5, 18], в первой рассмотрены данные по сравнительно длинным профилям за период с 1962 по 1980 г., а во второй — данные на относительно коротких, ближайших к вулкану участках с 1975 по 1982 г. В работе [5] подчеркивается, что вертикальные подвижки по двум радиальным к вулкану профилям происходят синхронно, и наиболее активные участки профилей находятся на расстоянии 7–10 км от кратера вулкана. Эти данные свидетельствуют о том, что профили пересекают одни и те же структурные нарушения в земной коре, и деформации на них вызваны одними и теми же причинами. По этим соображениям частые повторные нивелировки производились в дальнейшем только на одном профиле и на наиболее активном участке. Эти результаты представлены на рис. 6 за период с 1982 по 1986 г. Следует иметь в виду, что общее превышение

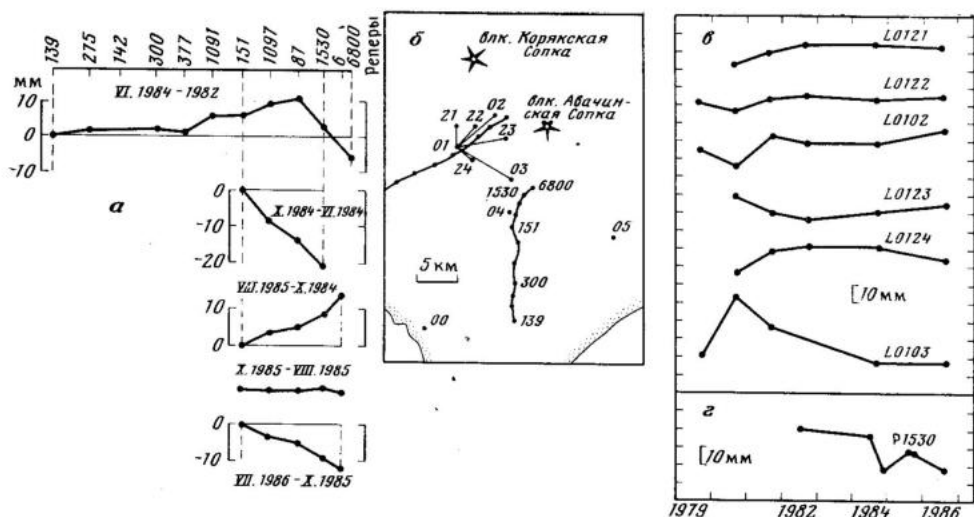


Рис. 6. Повторные геодезические измерения вблизи вулкана Авачинский; а — вертикальные смещения по профилю 139—6800; б — схема измерений; в — горизонтальные деформации; г — изменение отметки репера 1530 относительно репера 151

по профилю на базе 6 км около 400 м. Это увеличивает погрешность определения движения репера 6800 относительно репера 151, которая может быть в данном случае 4—5 мм.

Судя по сравнительно частым нивелировкам на участке 151—6800, вертикальные движения в 6 км к югу от вершины Авачинского вулкана носят знакопеременный характер. Однако сопоставление вертикальных движений здесь и горизонтальных деформаций на всем побережье Авачинского залива (по данным измерений из обсерватории Мишенная) показывает, что периодам относительного опускания подножия вулкана соответствует деформация растяжения на всей площади Петропавловск-Авачинского полигона, а периодам поднятия — деформация сжатия на той же территории. Подобный эффект был обнаружен и на Карымском вулкане [7].

Зависимость вертикальных подвижек вблизи Авачинского вулкана от характера горизонтальных деформаций на обширной, прилегающей к вулкану, площади, возможно, объясняется тем, что близповерхностный магматический очаг вулкана, имеющий меньшую вязкость, чем окружающая его среда, значительно деформируется и прежде всего в вертикальном направлении. Это происходит вследствие изменения деформаций сжатия и растяжения, происходящих на побережье Авачинского залива (данные тех же светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная). Во время сжатий магматический очаг выдавливается к поверхности земли, почти не меняя своей нижней границы. По-видимому, нами фиксируются вертикальные подвижки на радиально направленных к вулкану профилях, вызванные механизмом этого процесса. Однако повсеместное сжатие и вертикальный подъем верхней границы очага вулкана и, следовательно, подъем поверхности земли, не означают, что в этих условиях произойдет извержение вулкана. Например, очередной цикл извержения вулкана Карымский в 1976—1981 гг. происходил в условиях всеобщего растяжения земной поверхности на территории полигона площадью около 2000 км² [7].

На рис. 6, в показаны графики изменений длин линий вблизи Авачинского и Корякского вулканов (полигон Медвежка) за 1979—1986 гг. Три пункта этого полигона (01, 02, 03) являются местами постоянной установки отражателей, на которые из обсерватории Мишенная измеряются круглогодично линии с частотой в среднем 1 раз в неделю. Все линии

с пункта 01 по вееру измерялись светодальномером СГ-3 или Геодиметром-8 1 раз в год, в июле-августе, в течение нескольких дней, в наиболее благоприятные времена суток. Ошибка измерений составляла $2 \cdot 10^{-6}$. Изменения длин линий, за исключением данных по линии 0103 в 1980 г., весьма малы и почти не превышают ошибок измерений.

Приведенные в этом разделе данные свидетельствуют о следующем.

В настоящее время южное подножие Авачинского вулкана испытывает относительное опускание.

Взаимосвязь вертикальных подвижек вблизи Авачинского вулкана с горизонтальными деформациями в целом на побережье Авачинского залива говорит о том, что ослабленные зоны земной коры и магматические очаги под вулканами могут служить чувствительным индикатором горизонтальных напряжений, свойственных целому региону.

Вертикальные смещения на п-ове Камчатский¹ и сильные землетрясения в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг

Область сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг характеризуется интенсивными процессами деформирования земной коры и верхней мантии. Три последних сильных землетрясения в этом районе (15.XII.1971 г., $M=7,8$; 17.VIII.1983 г., $M=6,9$; 28.XII.1984 г., $M=7,5$) наглядно продемонстрировали динамику проникновения алеутских структур в глубь Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Землетрясение 15.XII.1971 г. произошло юго-восточнее мыса Камчатский на глубине 20–30 км, землетрясение 17.VIII.1983 г. — на глубине около 100 км под центром излучины Камчатского залива. Землетрясение 28.XII.1984 г. произошло в пределах земной коры, восточнее п-ова Камчатский (см. рис. 3). Все три землетрясения сопровождались интенсивными сериями афтершоков, которые обрисовали области очагов этих сильных событий.

Изучение современных движений земной поверхности в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг было начато в 1970 г., когда на п-ове Камчатский ИФЗ заложил нивелирный профиль длиной 70 км (см. рис. 2). Выбор данного района был связан с максимальной близостью к очаговым зонам землетрясений с $M>7$, которые предполагались в этом районе по долгосрочному прогнозу С. А. Федотова [13].

Первая нивелировка северного участка профиля длиной 45 км была выполнена ИФЗ в августе 1971 г. Последующие повторные нивелировки выполнялись осенью 1972 г. Институтом вулканологии (впервые весь 70-километровый профиль); в 1975–1978 гг. — предприятием ГУГК; в дальнейшем Институтом вулканологии осенью 1983 г., а после землетрясения 28.XII.1984 г. нивелировка 10-километрового северного участка профиля выполнялась несколько раз: в январе, феврале, апреле, июле 1985 г. и в феврале 1986 г.; весь профиль был повторен в июле-августе 1985 г. Нивелирование выполнялось по программе I класса. Случайные ошибки нивелирований всех лет лежат в пределах 0,5–0,8 мм/км хода. На 70-километровом профиле заложено 62 репера, в том числе 20 реперов скальных, 41 — грунтовых и 1 — фундаментальный. Среднее расстояние между реперами 1,1 км.

Все три сильных землетрясения, наблюдаемых в северной части Камчатского залива после первой нивелировки в 1971 г., сопровождались остаточными деформациями земной поверхности. В данном случае этими деформациями были вертикальные смещения, зарегистрированные между двумя соседними датами нивелировок.

¹ Камчатский полуостров один из крупных полуостровов на восточном побережье Камчатки, см. рис. 1.

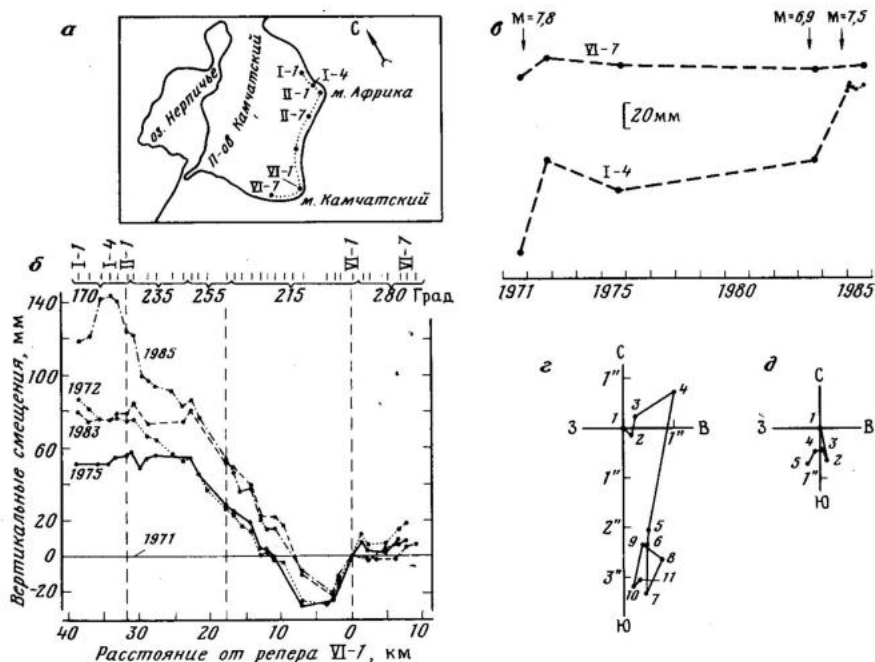


Рис. 7. Повторные нивелировки на п-ове Камчатский в период 1971—1986 гг.; а — схема расположения нивелирного хода (цепочка точек вдоль берега, где выделены отдельные реперы и подписаны их номера); б — вертикальные смещения реперов относительно репера VI-1; в — изменения отметок реперов VI-7 и I-4 относительно репера VI-1, вертикальными стрелками указаны моменты землетрясений; г — векторная диаграмма наклонов в точке мыс Африка; даты измерений в точках 1—11: 1 — IX.1971, 2 — IX.1972, 3 — VIII.1975, 4 — VIII.1983, 5 — 25.I.1985, 6 — 15.II.1985, 7 — 1.III.1985, 8 — 15.III.1985, 9 — 6.IV.1985, 10 — VII.1985, 11 — IX.1986; д — векторная диаграмма в точке мыс Камчатский; даты измерений в точках 1—5: 1 — IX.1971, 2 — IX.1972, 3 — VIII.1975, 4 — VIII.1983, 5 — VII.1985

Вертикальные смещения вдоль всего профиля приведены на рис. 7, б. Репер VI-1, расположенный на мысе Камчатский, в месте излома нивелирного хода под прямым углом, был принят за нуль отсчета.

После землетрясения 15.XII.1971 г. остаточные смещения на базе 35 км превысили 11 см. Произошел наклон полуострова на юг на 0,7 дуги [17]. Так как нивелирование было выполнено через 10 мес после землетрясения, то измеренные подвижки, по-видимому, дали нижнюю оценку произошедших смещений.

Повторные измерения (1975—1978 гг.) обнаружили изменение направления движения в основном в районе мыса Африка. Здесь максимальная амплитуда относительных смещений составила 3,5 см, а скорость — немногим более 1 см/год. В целом полуостров наклонился на север на 0,2 с дуги.

Нивелировка в 1983 г., выполненная через месяц после землетрясения 17 августа, вновь выявила подъем реперов северной части профиля относительно южной. Смещение на 35-километровой базе с 1975 по 1983 г. было близко к 3 см, т. е. наклон полуострова на юго-запад составил 0,2 с.

Вертикальные смещения после землетрясения 15.XII.1971 и 17.VIII.1983 г. имели одно и то же направление. Величины остаточных смещений были пропорциональны расстояниям от эпицентров землетрясений до нивелирного профиля. Вертикальные деформации после землетрясения 17.VIII.1983 г. оказались меньше.

28 декабря 1984 г. в 20 км от восточного побережья п-ова Камчатский, вблизи мыса Африка, произошло ожидавшееся по долгосрочному и сред-

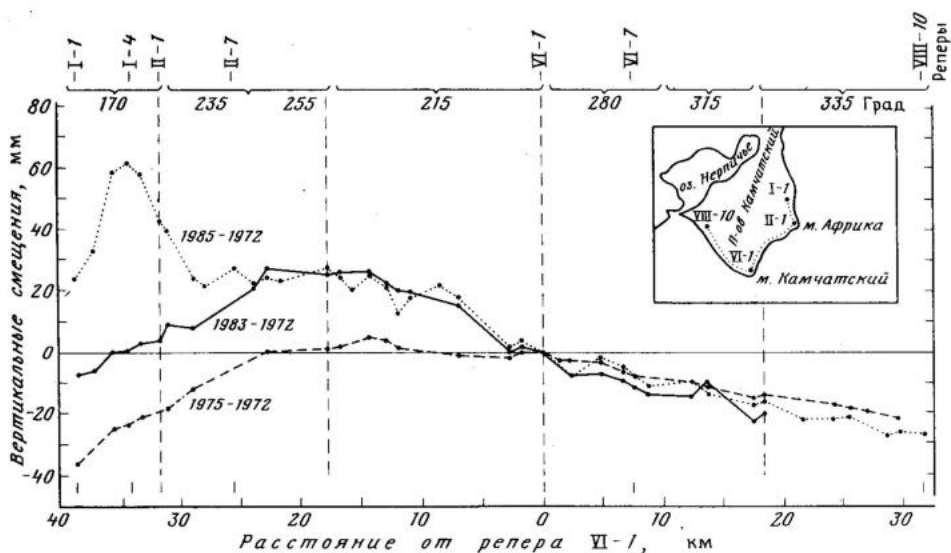


Рис. 8. Вертикальные смещения реперов относительно репера VI-1 на п-ове Камчатский в период 1972—1985 гг. На врезке показана схема расположения нивелирного хода

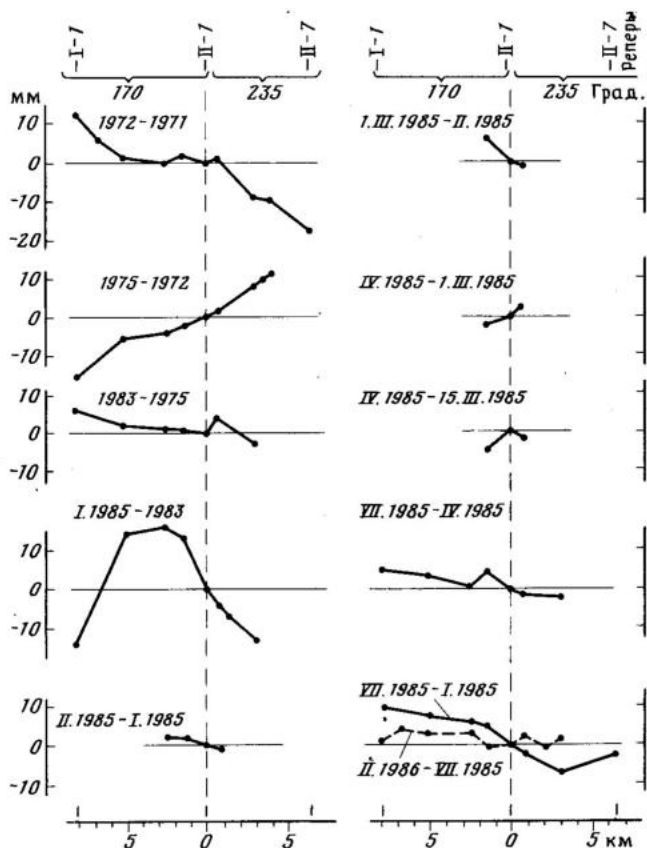


Рис. 9. Вертикальные смещения реперов относительно репера II-1 на мысе Африка, п-ов Камчатский, в период 1971—1986 гг.

несрочному прогнозам сильное землетрясение с $M=7,5$. Через 3 нед. после события была выполнена нивелировка 10-километрового северного участка профиля, наиболее близкого к эпицентру, а измерения по всему профилю были произведены летом 1985 г., через 7 мес. На основании результатов этих измерений можно считать, что существенные вертикальные подвижки произошли в районе мыса Африка (см. рис. 7, б). Здесь максимальные относительные смещения достигли 7 см на базе 15 км, наклон отдельных участков составил 3—4 с, однако общий наклон вдоль трассы протяженностью 18 км был направлен преимущественно на юг и равен 0,7 с дуги.

На рис. 8 представлен ход вертикальных смещений вдоль нивелирного профиля на четыре последние даты нивелирования. За начальную эпоху принята нивелировка 1972 г. При таком представлении результатов хорошо видно, что значительные смещения происходят на северном участке профиля от репера VI-1 до репера I-1. Азимут этой составляющей профиля близок к 45° . Вдоль участка от репера VI-1 до репера VIII-10, перпендикулярного к вышеназванному участку, вертикальные подвижки, превышающие ошибки измерений, после 1975 г. не наблюдались.

Наибольшее число нивелировок было выполнено в районе, ближайшем к эпицентру землетрясения 28.XII.1984 г. (рис. 9). На этом участке произошли наиболее сильные и контрастные движения. После землетрясения 28.XII.1984 г. здесь был выявлен участок профиля с большими скоростями и разнонаправленными смещениями. Северная часть профиля имела наклон на севере на 1,5 с по сравнению с данными за 1983 г., а на последующих секциях нивелирования наблюдался наклон на юг на 1,4 с дуги. Граница смены знаков движений проходит примерно в 2,5 км севернее мыса Африка и почти соответствует оси афтершоковой области землетрясения 28.XII.1984 г. По-видимому, такие знакопеременные вертикальные смещения на коротком участке профиля могут возникнуть в условиях сжатия этого района.

Общий ход относительных вертикальных подвижек в разных частях полуострова, связанных с сильными землетрясениями, приближенно отражен на рис. 7, в.

Для определения направления наклона отдельных частей полуострова были построены векторные диаграммы для двух точек профиля (мысы Камчатский и Африка), в которых профиль имеет излом почти под прямым углом (см. рис. 7, г, д). Для точки мыса Камчатский векторная диаграмма построена по секциям VI-1 — I-4 длиной 32 км и VI-1 — VI-7 длиной 8 км. После землетрясения 15.XII.1971 г. в этой точке отмечен наклон земной поверхности на ЮЮВ на 0,5 с дуги. Повторные измерения в 1975 г. обнаружили изменение направления наклона с ЮЮВ на ССВ. После землетрясений 17.VIII.1983 и 28.XII.1984 г. наблюдаются незначительные наклоны в ЮЗ направлении.

Для точки мыса Африка векторная диаграмма построена для двух примыкающих секций длиной 1,4 и 0,7 км. Здесь, через месяц после землетрясения 28.XII.1984 г., зарегистрирован наклон на юг более 2 с дуги. Примечательно, что в этой точке в течение 2 мес после землетрясения происходил наклон в ту же сторону, т. е. на юг, далее он был почти обратным, но измерения через 7 мес снова показали наклон на юг. Максимальная величина наклона была близка 3,5 с дуги. В период с июля 1985 по сентябрь 1986 г. наклон почти отсутствовал, т. е. через полгода после сейсмического события заметных вертикальных подвижек здесь не наблюдалось.

Завершая обсуждение геодезических измерений, проведенных на побережье п-ова Камчатский в связи с ожидавшимися и происшедшими землетрясениями, можно сказать следующее.

1. Перед сильными землетрясениями с $M > 7$, с эпицентрами в северной части Камчатского залива происходит наклон п-ова Камчатский на север, северо-запад; наклон можно рассматривать как один из предвестников землетрясения.

2. После сильных землетрясений с $M > 7$, с эпицентрами в северной части Камчатского залива, п-ов Камчатский испытывает наклон на юг, юго-восток. Величина наклона близка $0,7$ с дуги.

3. Разнонаправленность вертикальных смещений, происшедших в районе мыса Африка после землетрясения 28.XII.1984 г., может быть, указывает на оживление субширотной сейсмической зоны, находящейся в условиях сжатия.

Заключение

Повторные геодезические измерения, выполненные Институтом вулканологии ДВНЦ АН СССР в отдельных районах Камчатки, о которых говорилось в данной статье, дали интересный фактический материал о деформациях земной поверхности, связанных с сильными землетрясениями и наблюдаемых в периоды относительного сейсмического затишья. Представляется, что среди полученных результатов наиболее важны следующие.

1. Наклон п-ова Камчатский преимущественно на юг на $0,5-0,7$ с дуги наблюдался после землетрясений с $M = 7,8$ и $7,5$ в северной части Камчатского залива.

2. Плавные горизонтальные деформации сжатия на величину $1-3 \cdot 10^{-6}$ в течение 7-10 мес на побережье Авачинского залива соответствуют периодам спада сейсмической активности. Увеличению сейсмической активности здесь предшествует деформация сжатия на территории полигона по всем направлениям.

3. Подножие Авачинского вулкана воздымается, когда происходят деформации сжатия на побережье Авачинского залива, и опускается при деформациях растяжения. Периферический магматический очаг реагирует на изменение деформаций в районе вулкана.

Данные, приведенные в статье, можно использовать для построения геодинамических моделей и в работах по прогнозу сильных землетрясений в области островных дуг, а также для исследования механизма вулканической деятельности.

Авторы благодарят сотрудников Лаборатории геодезии Института вулканологии ДВНЦ АН СССР В. С. Целищева, А. В. Бабенко, Ю. Л. Дудко, В. М. Мирошникова, Ю. И. Круглова, Э. М. Кебедову, М. И. Лакотко, А. В. Сапрыкина, А. В. Сокоренко — участников измерений, без самоотверженного труда которых не были бы получены качественные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахтиаров В. Ф., Левин В. Е., Энман В. Б. Круглогодичные светодальномерные измерения на Петропавловск-Авачинском полигоне // Комплексные геодинамические полигоны. М.: Наука, 1984. С. 25—29.
2. Жаринов Н. А., Еремеев Н. Н. Деформаций земной поверхности Ключевского вулкана, предвзвешившие и сопровождавшие извержение, предсказанное в 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 88—97.
3. Золотарская С. Б. Результаты повторного нивелирования на территории Дальнего Востока и Северо-Восточной Сибири // IX Междувед. совещание по изучению современных движений земной коры на геодинамических полигонах. Тез. докладов. Петропавловск-Камчатский, 1981. 15 с.
4. Золотарская С. Б., Никитенко Ю. П., Шароглазова Г. А., Кириенко А. П. Изучение деформаций земной поверхности по повторным геодезическим измерениям на полуострове Камчатка // 7-й Междунар. симпозиум по современным движениям земной коры. Таллин, 1986. Тез. докладов. Таллин, 1986. 54 с. (рус.).
5. Кириенко А. П., Никитенко Ю. П. Особенности горизонтальных и вертикальных деформаций земной поверхности на Петропавловском геодинамическом полигоне

- (Камчатка) за период 1974—1982 гг.//Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 38—47.
6. Левин В. Е. О методике обработки суточных серий светодальномерных измерений//Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. М.: Радио и связь, 1981. С. 58—60.
 7. Магуськин М. А., Кириенко А. П., Широков В. А., Никитенко Ю. П. Современные движения и сейсмичность на Карымской вулканической структуре в период 1972—1984 гг.//7-й Междунар. симпозиум по современным движениям земной коры. Тез. докладов. Таллин, 1986. 87 с. (рус.).
 8. Магуськин М. А., Энман В. Б., Селезнев Б. В., Шкред В. И. Особенности смещений земной поверхности на вулкане Карымский по геодезическим и фотограмметрическим данным за период 1970—1981 гг.//Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 49—64.
 9. Мелекесцев И. В., Шанцер А. Е., Эрлих Э. Н. Новейшая тектоника//Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: Наука, 1974. С. 345—368.
 10. Никитенко Ю. П., Шульман В. А., Семенов В. И., Энман В. Б. Геодезические исследования на Камчатском геодинамическом полигоне за 1972—1976 гг.//Новые данные о строении коры и верхней мантии Курило-Камчатского и Японского регионов. Владивосток, 1978. С. 148—153.
 11. Супруненко О. Н., Декин Г. П. Об особенностях гравитационного поля Южной Камчатки//Докл. АН СССР. 1968. Т. 181. № 4. С. 956—959.
 12. Тихонов В. И., Ривош Л. А. Новые данные о тектоническом строении Южной Камчатки (по результатам геологических и аэромагнитных работ)//Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 6. С. 59—68.
 13. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
 14. Федотов С. А., Энман В. Б. Программа геодезических работ по изучению современных движений земной коры на Камчатке//Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, 1973. С. 267—273.
 15. Федотов С. А., Энман В. Б., Никитенко Ю. П. и др. Геодезические исследования//Большое трещинное Толбачинское извержение (1975—1976 гг., Камчатка). Гл. 14. М.: Наука, 1984. С. 472—513.
 16. Шарогазова Г. М. Деформации земной поверхности на Шипунском полигоне, полученные по геодезическим данным 1975 и 1981 гг. Научно-техн. реферат. сб. Т. 110, М., ЦНИИГАиК, 1984. С. 15—20.
 17. Энман В. Б. Деформации земной поверхности в области сильных Камчатских землетрясений 1971 г.//Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 23.
 18. Энман С. В., Золотарская С. Б., Никитенко Ю. П., Энман В. Б. Закономерности вертикальных движений земной поверхности на Петропавловском-Авачинском геодинамическом полигоне//Вулканология и сейсмология. 1986. № 4. С. 102—108.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР

Поступила в редакцию
16.11.1987