

УДК 550.31

25-летию мониторинга СДЗК
из обсерватории "МИШЕННАЯ" посвящается

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА КАМЧАТКЕ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧЕСКОЙ И ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ

**В. Е. Левин¹, М. А. Магуськин², В. Ф. Бахтиаров¹, В. М. Павлов¹,
М. Т. Прилепин³, Н. Н. Титков¹**

¹ *Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН,
683006, Петропавловск-Камчатский, Россия*

² *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
683006, Петропавловск-Камчатский, Россия*

³ *Институт Физики Земли РАН, Москва, Б. Грузинская 10, Россия*

Аннотация. Создана и развивается система геодезического мониторинга современных движений земной коры на Камчатке. В результате экспериментальных работ по изучению современных движений земной коры на Камчатке при использовании различных измерительных систем и приборов (нивелиров, светодальномеров, скважинных деформографов, GPS приемников) получены численные характеристики деформационных процессов. Зарегистрированные деформационные процессы связаны с такими геодинамическими природными явлениями, как землетрясения и извержения вулканов. На основе геодезических данных предложены математические модели этих явлений. Определены скорости СДЗК на Камчатском полуострове, обусловленные геодинамическими процессами, происходящими в зоне субдукции.

RECENT CRUST MOVEMENTS AND THEIR RELATION TO THE SEISMIC AND VOLCANIC ACTIVITIES ON THE KAMCHATKA PENINSULA

**V. Ye. Levin¹, M. A. Maguskin², V. F. Bakhtiarov¹, V. M. Pavlov¹,
M. T. Prilepin³, N. N. Titkov¹**

¹ *Kamchatka Experimental and Methodical Seismological Department, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, 9 Piip av., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia, Ph. (7-415) 225-9152, Fax. (7-415) 225-9523, e-mail lev@emsd.iks.ru*

² *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division Russian Academy of Sciences, 9 Piip av., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia, Ph. (7-415) 225-9502*

³ *Institute Physics of the Earth Russian Academy of Sciences, Moscow B. Gruzinskaya 10, Russia.*

Abstract. The monitoring system of the recent crust movements in Kamchatka has been created and currently is under development. The numerical characteristics of deformation processes were obtained as a result of experimental investigation on the recent crust movements in Kamchatka using various instruments (e.g. leveling instruments, EDM, borehole strainmeter, GPS receivers). Measured deformation processes were found to be related to such natural geodynamic phenomena as earthquakes and volcanic eruptions. Mathematical models of these phenomena have been developed on the basis of actual geodetic data. Rates of the Kamchatka crust movements governed by subduction processes have been found.

Введение

В 70-тые годы XX века на Камчатском полуострове начались работы по созданию прогностического полигона для комплексных исследований современных движений земной коры (СДЗК).

В те годы научные задачи по изучению СДЗК были сформулированы так:

- детальные исследования локальных деформаций на небольших наиболее активных площадках и вулканах;
- измерение величин и накопления деформаций в наиболее сейсмоактивных районах;
- измерение тектонической активности крупных геологических структур Камчатки;
- выявление современных движений, связанных с развитием островных дуг.

Одним из главных направлений наших научных исследований было построение наблюдательных сетей, способных зарегистрировать современные движения земной поверхности, связанные с сейсмической и вулканической активностью. Нам казалось, что удастся быстро зарегистрировать предвестники землетрясений и извержений вулканов, тем более что на Гармском прогностическом полигоне Института Физики Земли были получены обнадеживающие результаты по выявлению предвестников землетрясений.

Отчетливое понимание роли изучения современных движений земной коры в деле прогноза землетрясений было осознано после появления работы Рида [23], в которой по результатам изучения Сан-Францисского землетрясения была предложена концепция подготовки и реализации одного типа землетрясений - концепция упругой отдачи — на разломе Сан-Андреас. Как мы теперь понимаем, разлом Сан-Андреас - трансформный разлом, по которому идет взаимное перемещение Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит с относительной скоростью порядка 50 мм/год. По Риду разлом Сан-Андреас — крупный правосторонний разлом, борта которого смещаются относительно друг друга. На некоторых участках, в определенные периоды движение прекращается - разлом запирается и в этом месте начинает накапливаться упругая энергия. Поскольку периферические части литосферы продолжают двигаться, на линии разлома накапливаются напряжения. Как только будут преодолены силы сцепления бортов, произойдет движение с выделением сейсмической энергии, несущей разрушения. Эти представления, пусть упрощенные, показали, что следить за накоплением энергии можно, измеряя изменения взаимного положения (по горизонтали и вертикали) геодезических пунктов, расположенных по разные стороны разлома.

Известно, что внутренняя жизнь планеты в том или ином регионе на поверхности проявляется в первую очередь в виде различного вида деформаций вплоть до разрывов и движений, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, например при Аляскинском землетрясении 1964 г. [22]. Возможно раннее инструментальное изучение этих деформаций — наиболее надежный способ прогноза тех явлений, которые могут последовать в результате накопления деформаций, когда будет перейден предел прочности горных пород, слагающих земную кору и высвобождение энергии, реализуется в виде катастрофических явлений, таких как землетрясения и извержения вулканов. Для определения момента, когда начинается накопление деформаций необходимо знать “фоновые” деформации, характерные для того или иного региона. Оценка “фоновых” значений совсем не простая задача, особенно для районов континентальных окраин, где присутствие таких геодинамических процессов как вулканизм и сейсмичность делают эту задачу еще более сложной. Безусловно, формирование наших научных программ инструментального изучения процессов подготовки землетрясений было основано, главным образом на работах Г.А. Гамбурцева и его последователей. С геодезической точки зрения наиболее интересны работы, выполненные на Гармском полигоне в зоне сочленения Памирской и Тяньшанской горных систем. Еще в эпоху до “плейтектоники” геологи и геофизики

имели геологические доказательства факта надвигания Памирской системы на Тянь-Шанскую, обусловленные, как мы теперь знаем коллизией Индостанской и Евразийской плит. Классические геодезические построения звеньев триангуляции, где длина базисов измерялась инварными проволоками, а стороны треугольников составляли 10-25 км каких либо прогностических признаков дать не могли из-за малой частоты повторений — 1 раз в год, но порядок годовых скоростей горизонтального и вертикального деформирования был определен вполне надежно. К моменту начала наших работ на Камчатском полигоне метод триангуляции исчерпал себя, в смысле дальнейшего повышения точности определения плановых координат, из-за ошибок измерения углов, которые не удавалось снизить меньше чем 0,5"-0,7". Определение длины замыкающей линии в звене триангуляции длиной 200-300 км, опирающейся на два базиса, измеряемые с точностью близкой к $1 \cdot 10^{-6}$, могло быть выполнено с относительной ошибкой не лучше $3-4 \cdot 10^{-6}$. Ходы полигонометрии, где все линии измерялись инварными проволоками, могли обеспечить точность близкую к $1 \cdot 10^{-6}$, но не могли найти широкого применения из-за громоздкости, дороговизны и трудной реализации в условиях горной местности. Мы начали свои исследования СДЗК с помощью светодальномеров.

Разрешающая способность светодальномеров, использующих в качестве излучателей лазеры, достигла величин порядка одного мм, однако, практическая точность была много ниже из-за неточного знания среднеинтегрального показателя преломления по трассе измерений. В равнинной местности определение температуры, давления и влажности даже в одной точке стояния инструмента позволяет измерять линии длиной до 20-25 км с относительной ошибкой $1 \cdot 10^{-6}$. Во всхолмленных и горных районах эта погрешность возрастала до $2-3 \cdot 10^{-6}$. В целом в ряде ответственных проектов приходилось определять средние параметры атмосферы по лучу измерения, пролетая трассу на вертолете или самолете, оборудованным метеодатчиками. Это сильно удорожало работы с дальномерами.

Поиски аппаратного решения задачи по определению интегральных характеристик метеопараметров по лучу измерения увенчалась успехом в 1956 году, когда был предложен дальномер-рефрактометр [14].

В этом устройстве кроме собственно измерения расстояния на одной длине волны излучения, измерялась еще разность оптических путей на двух, особым образом подобранных длинах волн. Точность определения интегрального показателя преломления тем выше, чем дальше по спектру разнесены выбранные длины волн, при этом одна длина волны должна лежать в коротковолновой части спектра, сильно поглощаемой атмосферой. В целях увеличения дальности действия прибора разность оптических путей предлагалось измерять на отражателе, а собственно измерение линии — в точке стояния самого инструмента [14]. В долазерную эпоху это было существенно. Идея измерения разности оптических путей была проверена в лабораторных условиях на макете дальномера ЦНИИГАиК, используя две линии излучения в спектре ртутной лампы, а атмосфера имитировалась набором пластин из оптического стекла. В 1958 году эта же идея независимо была предложена американскими учеными П. Бендером и Т. Томсоном. Работа П. Бендера и Т. Томсона успешно продолжалась Хаггетом и Слейтером [20,21], которые построили действующий макет долгое время эксплуатировавшийся на разломе Холистер в Калифорнии при изучении современных деформаций земной поверхности для прогноза землетрясений. В качестве источников использовались гелий - неоновые и кадмиевые лазеры. Позже, в 1979 г. они организовали фирму, где стали выпускать серийно дальномеры — рефрактометры под названием Терраметр. Основными потребителями были военные геодезисты и специалисты, занимающиеся изучением деформаций земной коры. При появлении мощных, портативных и экономичных лазеров для коротковолновой части спектра Терраметры были усовершенствованы. Многолетний опыт их использования при изучении деформаций показал, что они обеспечивают точность на уровне $0,5 \cdot 10^{-7}$ при длинах линий до 30 км.

Работа по реализации дальномера — рефрактометра длительное время велась в ЦНИИГАиК и ГОИ им. Вавилова [6], однако к серийному и даже макетному рабочему варианту прибора она не привела. В конце 70-х годов работа с целью ликвидации отставания в технической базе по созданию дальномеров — рефрактометров началась в Институте Радиоэлектроники (ИРЭ) Академии Наук, где радиоинженером С.В. Таракановым под руководством проф. Н.А. Арманда, была разработана оригинальная схема дальномера — рефрактометра [1]. Испытание и доработка действующего макета прибора проводилась на Камчатке в обсерватории “Мишенная”. В процессе реальных условий наблюдений за СДЗК на геодинатическом полигоне были сделаны измерения [3] и внесены существенные изменения в схему прибора [2]. После доработки действующий макет дальномера — рефрактометра по ряду показателей стал лучше Терраметра.

GPS — Глобальная система определения местоположения (позиционирования) разрабатывалась в основном для целей военно-морских сил и аэронавигации, но быстро и по достоинству была оценена гражданскими геодезистами. Их огромный научный потенциал, а также профессионализм измерителей и обработчиков привел к быстрому совершенствованию системы в целом, особенно важным был переход к фазовым измерениям, чем совсем не занимались специалисты — навигаторы в силу специфики решаемых ими задач.

Уже первые опыты использования GPS в чисто геодезических целях, проведенные в середине 90-х годов, показали, что новые технологии позволяют определять взаимное расположение пунктов (точек) с точностью $\pm 2-3$ см при удалении их друг от друга на сотни километров при значительной экономической эффективности. Уже к середине последнего десятилетия прошлого века многие зарубежные фирмы стали выпускать специализированные геодезические приемники, при этом были значительно усовершенствованы методические вопросы учета влияния атмосферы за счет разработки более совершенных моделей строения сухой и влажной компонент воздуха. Наличие в геодезических приемниках возможности принимать две частоты, позволило значительно ослаблять влияние ионосферы на скорость распространения сигнала, используя тот же дисперсионный метод, который был применен в прецизионных светодальномерах. Однако, главным обстоятельством, влияющим на повышение точности, следует считать введение в 1994 году специальной службы, работающей в рамках международной ассоциации, призванной обеспечивать гражданских потребителей GPS прецизионными орбитами спутников GPS. Эта служба получила название IGS — Международная Геодинатическая служба. В названии слово Геодинатическая потому, что к этому периоду вполне отчетливо стали осознавать, что главные вопросы к точности идут от специалистов решающих геодинатические задачи. В этот разряд перешли и задачи по изучению современных движений земной коры, задачи по изучению деформационных предвестников землетрясений, а в последние годы — изучение постсейсмических деформаций и задачи по изучению движения глобальных литосферных плит и деформаций на границах плит. Этот второй этап развития работ характерен для многих проектов, выполняемых в рамках, главным образом, Международных кооперативных проектов, по которым наблюдения выполняются по эпохам один раз в 2-3 года при общей продолжительности в десять и более лет.

Характерно комплексирование различных технологий. Достигнутые в этих проектах точности определения линейных деформаций характеризуются величинами $2 \cdot 10^{-8}$ при расстояниях между пунктами 100-500 км. Горизонтальные компоненты скоростей пунктов в принятой системе координат уверенно определяются на уровне $\pm 1-2$ мм/год, а вертикальные компоненты в 2-3 раза хуже.

Сегодняшний этап развития GPS исследований (конец XX века и по настоящее время) характерен развитием глобальных и региональных GPS сетей на основе постоянно работающих станций.

Изучение СДЗК на Камчатке и сейсмичность

Развернутая программа инструментального изучения СДЗК на Камчатке началось в 1971 году и к настоящему времени накопилось несколько случаев регистрации горизонтальных или вертикальных деформаций, связанных с сейсмичностью района исследований. Работы начинались с создания сети полигонов, которые к настоящему времени уже охватывают всю территорию Камчатки (рис. 1, рис. 2). Созданная нами система наблюдений позволяет проводить исследования СДЗК с частотой опроса от нескольких лет до дней и решать научные задачи такие как:

1. Изучение движений земной поверхности на границе континентального и океанического блоков;
2. Регистрация деформаций земной поверхности вблизи вулканов для получения численных характеристик, необходимых для построения моделей процессов извержения вулканов, а также прогностических признаков этих явлений;
3. Изучение пространственно-временного характера движений, связанных с глубинными процессами, обуславливающими взаимодействие региональных структур в процессе развития островной дуги;
4. Смещения, связанные с землетрясениями.

На рис. 3 приведены землетрясения, от которых были зарегистрированы, как вертикальные, так и горизонтальные компоненты деформаций земной коры. Методом повторного нивелирования были обнаружены изменения превышений по нивелирному профилю в районе мыса Африка, которые связаны с землетрясением (1) 15.12.1971 г. и с землетрясением (3) 28.12.1984 г. (рис. 4). Относительные изменения отметок реперов до 80 мм совпадают по знаку с механизмом землетрясения - взброс для землетрясения 15.12.71 [7] и сдвиг с небольшой взбросовой компонентой для землетрясения 28.12.84. Измерения на отдельных локальных полигонах в районе Авачинского залива, в районе п. Малки, хребта Кумроч, мысе Шипунском по поиску “живых” разломов на которых мы могли бы зарегистрировать скорости перемещения их бортов, предполагаемых геологами, а также смещений, связанных с землетрясениями не принесли успеха. За время наблюдений, смещения превышающие ошибки наблюдений, обнаружены не были. Основные результаты светодальномерных исследований в период 1972 - 1979 годов, когда мы работали дискретно, т.е. период повторения наблюдений месяцы и более таковы:

1. доказана возможность высокоточных светодальномерных измерений с точностью $1-2 \cdot 10^{-6}$;
2. разработана специальная методика высокоточных дальномерных наблюдений применимая и для круглогодичного светодальномерного мониторинга горизонтальной составляющей СДЗК с точностью до $1 \cdot 10^{-6}$;
3. подтверждена гипотеза, что значимые деформации СДЗК на геологических разломах могут проявляться только во время сильных ($M > 7$) землетрясений;
4. для регистрации деформационных предвестников землетрясений и изучения фоновых значений деформаций района исследований необходимо проводить “непрерывные” светодальномерные измерения.

С 1979 года началась эпоха светодальномерного мониторинга СДЗК на Камчатке в районе Авачинского залива из обсерватории “Мишенная”. Подобный светодальномерный мониторинг позднее был организован в США (Калифорния), в Японии и в СССР на прогностических полигонах в Таджикистане (Гарм), в Киргизии (полигон ИВТАН). За период проведения мониторинга наблюдались медленные упругие деформации Петропавловск - Авачинского полигона порядка $1-3 \cdot 10^{-6}$ и быстрые упругие деформации порядка $1-3 \cdot 10^{-6}$ при точности измерений $0.5-0.8 \cdot 10^{-6}$ [4].

На основании временного ряда результатов светодальномерного мониторинга в районе Авачинского залива (рис. 5) наблюдается сжатие района (тренд) в крест сейсмофокальной зоны со скоростью $1 \cdot 10^{-7}$ /год (1-3 мм/год). Данное сжатие, обусловлено

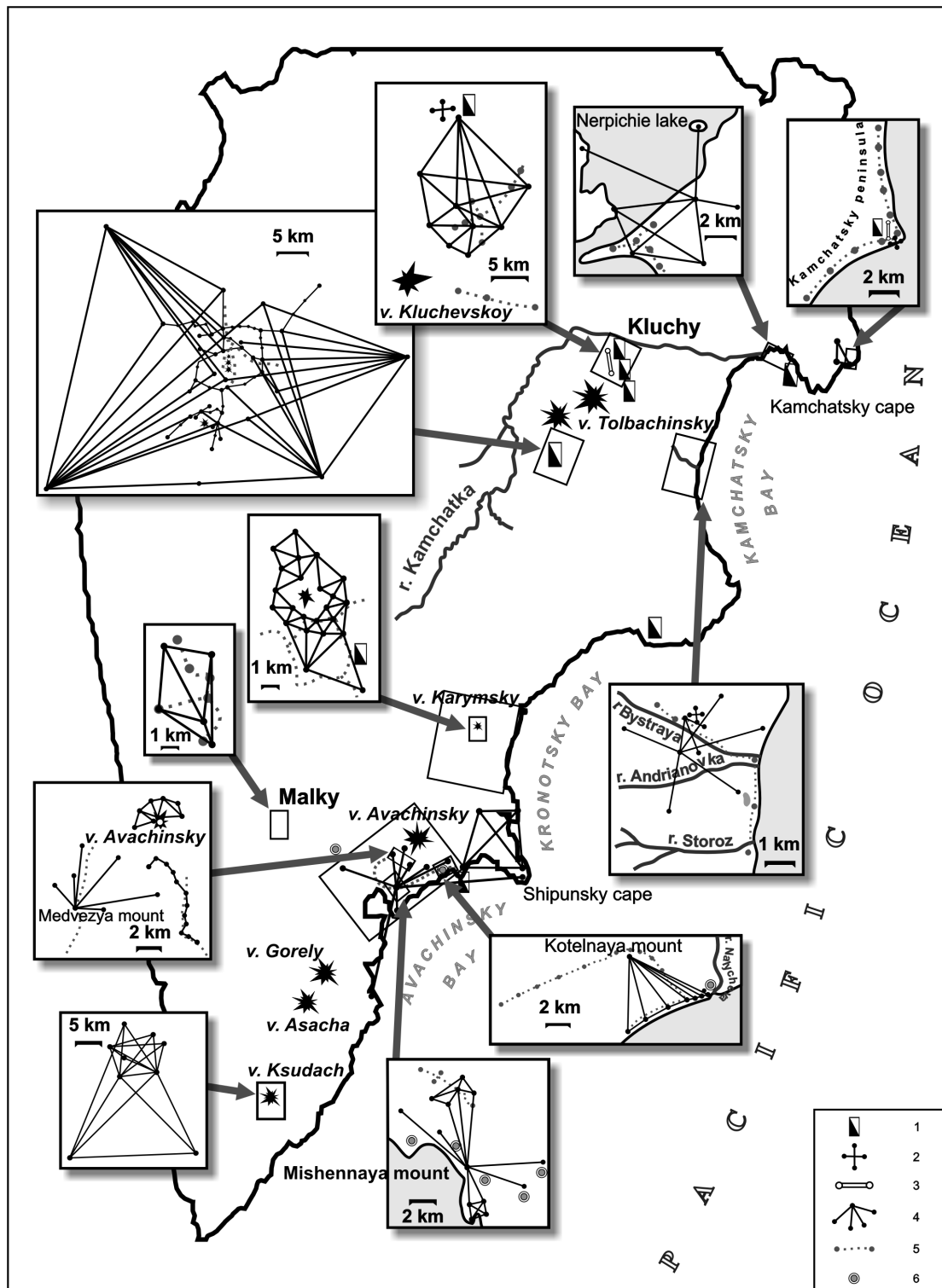


Рис. 1. Схема геодезических измерений деформаций земной поверхности на Камчатке (работы Института вулканологии ДВО РАН).

1 – пункты непрерывных наклономерных наблюдений; 2 – нивелирные наклономерные площадки; 3 – гидростатические наклонометры; 4 – линии, вдоль которых светодальномерами измеряются горизонтальные смещения; 5 – трассы нивелирования I класса; 6 – мобильные GPS-станции.

Fig. 1. Geodetic observations of Kamchatka crustal deformations (done by Institute of Volcanology FED RAS).

1 – continuous tiltmeter points; 2 – levelling tiltmeter sites; 3 – hydrostatic tiltmeters; 4 – lines of horizontal displacements EDM measurements; levelling routes of 1st class; 6 – mobile GPS-station.

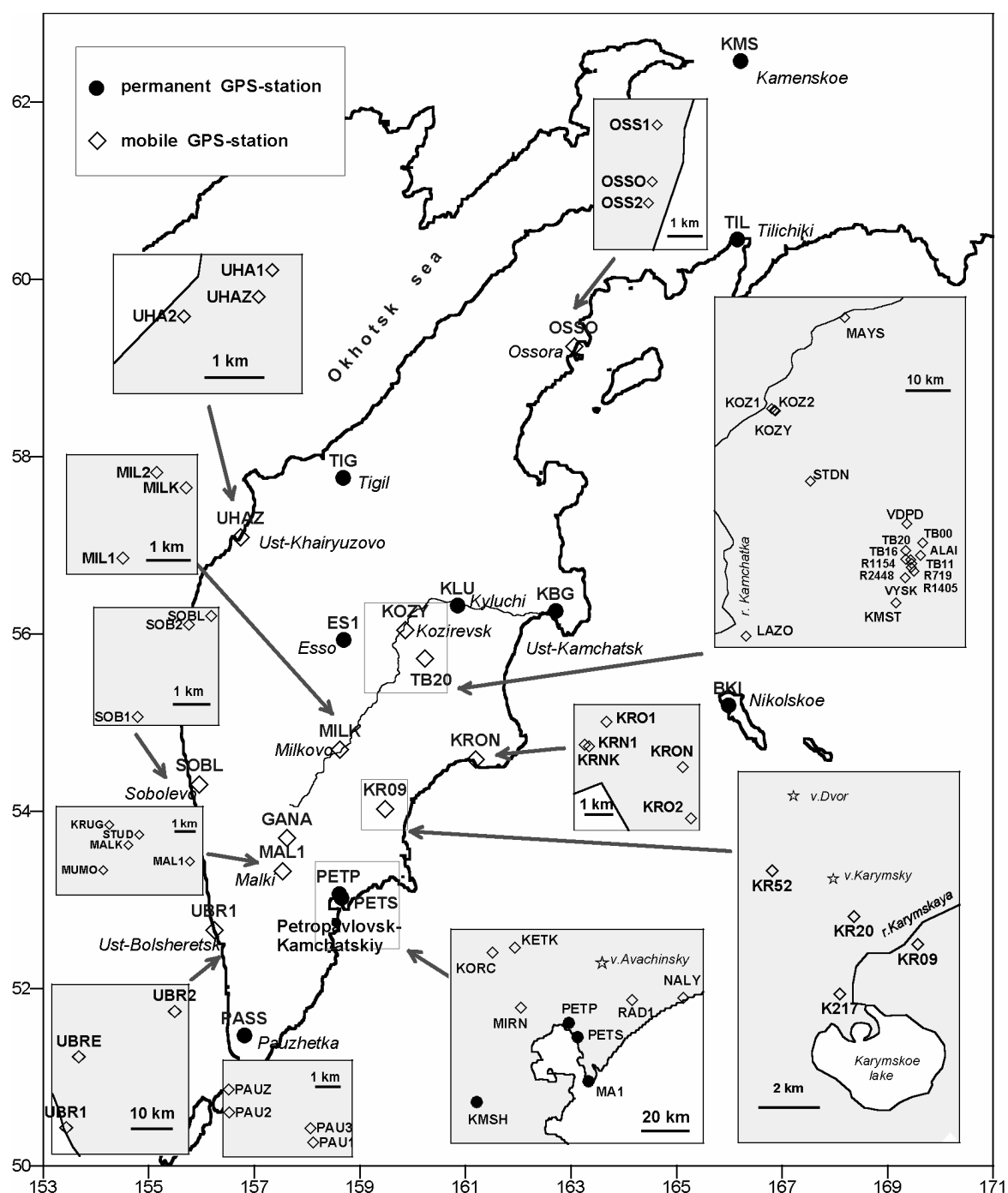


Рис. 2. Схема GPS измерений на Камчатке (KAMNET).

Fig. 2. Kamchatka GPS network (KAMNET).

геодинамическими процессами зоны субдукции. Факт такого проявления СДЗК, а также скорости сжатия нами подтверждены последующими GPS измерениями.

Кроме наблюдаемого тренда (деформации сжатия) методом светодальномерного мониторинга зарегистрированы упругие бухтообразные вариации деформаций района Авачинского залива (рис. 5), которые мы связываем с землетрясениями (2) 17.10.1983 $M_w=7.0$ ($D=350$ км), (5) 02.03.92 $M_w=6.8$ ($D=100$ км) и (11) 5.12.97 $M_w=7.8$ ($D=350$ км) (где D – расстояние от места регистрации до эпицентра землетрясения). Уменьшение амплитуды деформационных бухт с течением времени, по-видимому, связано с увеличением напряжений в районе Авачинского залива, как следствие увеличения сжатия региона под влиянием геодинамических процессов, происходящих в зоне

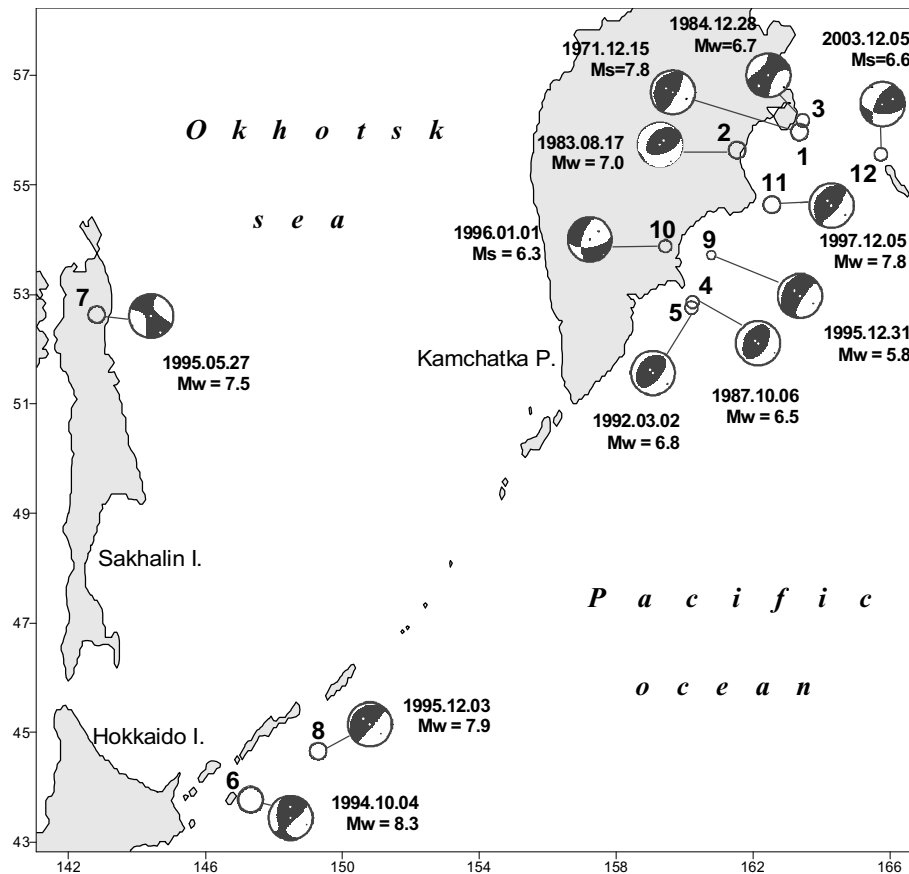


Рис. 3. Землетрясения, от которых были зарегистрированы, как вертикальные, так и горизонтальные компоненты СДЗК.

Fig. 3. Epicenters of Earthquakes from which both vertical and horizontal displacements have been observed.

субдукции. Естественно, как видно из графика произошедшие сильные землетрясения не снимают накопившиеся напряжения в районе Авачинского залива, но наиболее сильные сбросы напряжений до $2 \cdot 10^{-6}$ происходят после землетрясений с $M > 7.0$. Кроме того, изменение скорости тренда может служить предвестником сильного (с $M > 7$) землетрясения в районе Авачинского залива.

На землетрясение (2) 17.08.83 с $M_w=7.0$ был дан удачный прогноз [19], благодаря чему нам впервые удалось зарегистрировать как горизонтальные, так и вертикальные смещения в эпицентральной зоне (рис. 6) до, во время и после сейсмического события. Светодальномерные измерения в эпицентральной зоне землетрясения 17.08.83 с $M_w=7.0$, были организованы как вдоль, так и в крест предполагаемого геологического разлома. Величина амплитуды косейсмического скачка деформации от 2ppm до 4ppm на взаимно-перпендикулярных линиях (линия 1-3 и линия 1-2), а также близкие по величине 16.9 мм/год и 16.4 мм/год скорости последующих афтершоковых деформаций сжатия и растяжения вдоль соответствующих линий, можно интерпретировать как движение по разлому вдоль реки Быстрая, и как случай, когда разлом проявился при сильном ($M > 7$) и близком ($D=7\text{km}$) землетрясении. Измеренные инструментально компоненты СДЗК от данного сейсмического события были: до основного толчка скорость вертикальной компоненты смещений 2 мм/день, а горизонтальной 6 мм/день, а после основного толчка 16 мм/год. Обращает на себя внимание похожий характер горизонтальных деформаций, зарегистрированных от землетрясений с разной магнитудой $M=5.3$, $M=6.5$ и $M=7.0$, произошедших в разных районах Камчатки (рис.7). Наблюдается упругий характер деформационных процессов, и чем больше энергия землетрясения, тем больше амплитуда горизонтальных деформаций. Это была первая

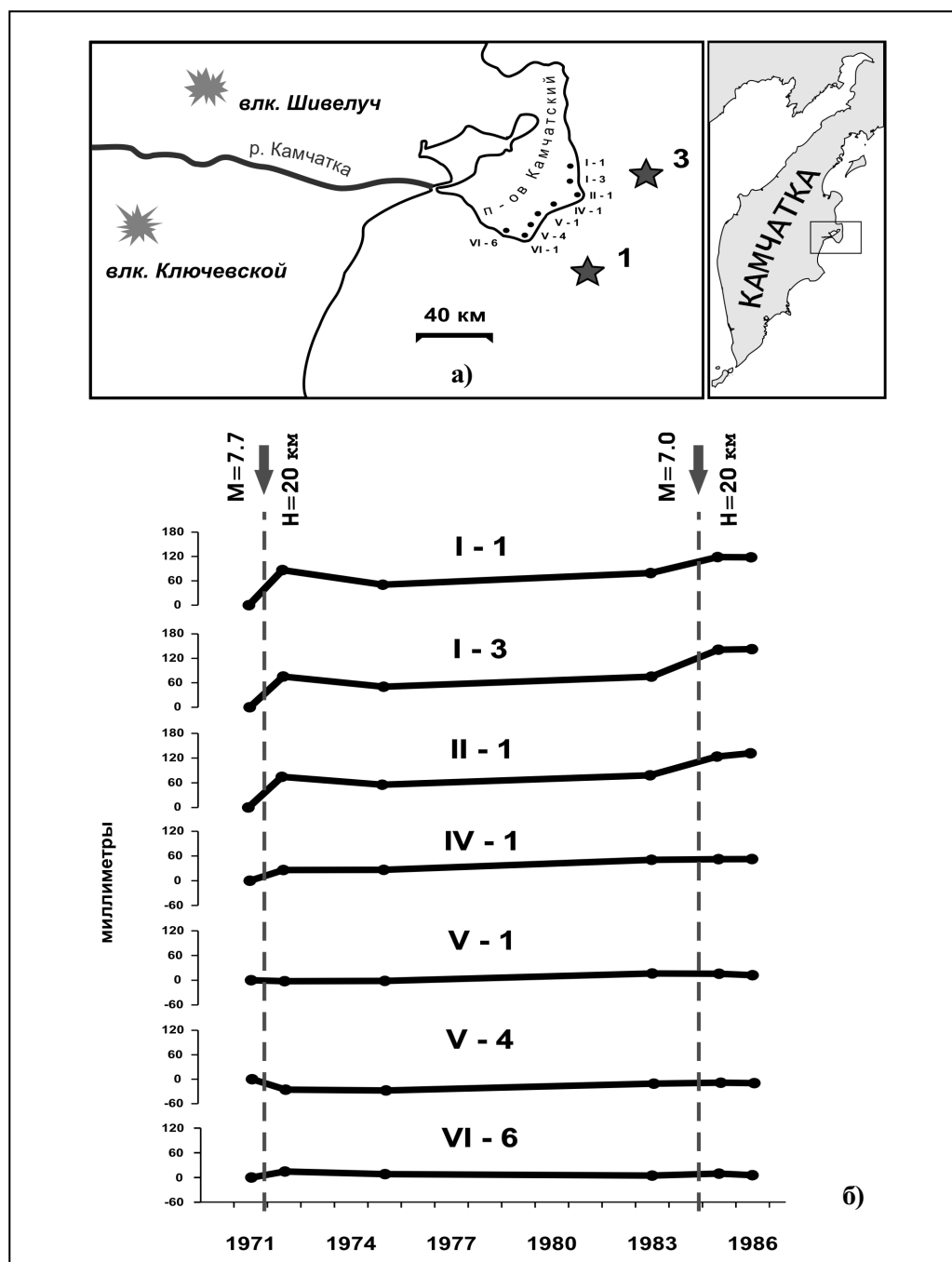


Рис. 4. Вертикальные деформации в связи с сильными землетрясениями.

а) — схема расположения реперов и эпицентров землетрясений; б) — смещения реперов относительно их положения летом 1971г.

Fig. 4. Vertical deformations after strong earthquakes.

а) distribution of benchmarks and epicenters; б) — benchmark displacements relative to those of summer 1971.

в нашей практике надежно зарегистрированная аномалия горизонтальных деформаций, которую мы могли определить как краткосрочный геодезический предвестник землетрясения.

Отметим, что работы ГУГК по проблеме СДЗК на Камчатке проводилась на отдельных полигонах площадью до 800 км² с частотой повторных наблюдений в 3-5 лет. Результаты этих производственных наблюдений, с учетом невысокой их точности ($4 \cdot 10^{-6}$), можно использовать для обнаружения участков с возможными контрастными движениями [8].

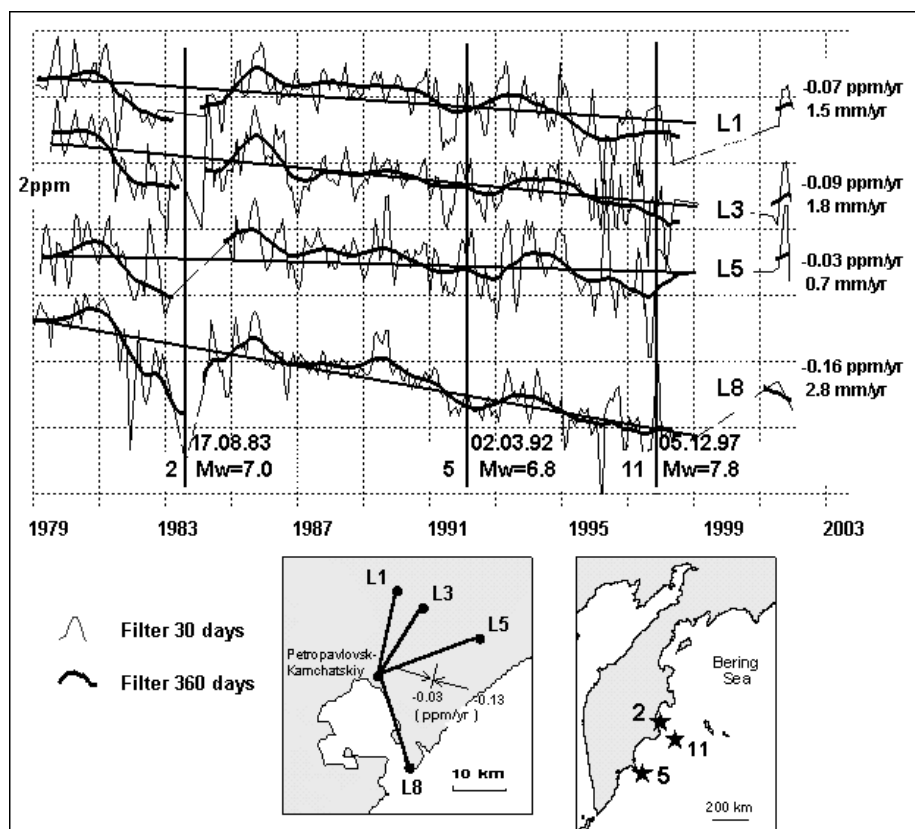


Рис 5. Результаты линейных измерений из обсерватории Мишенная.

Fig. 5. Results of linear displacements measurements done at Mishennaya station.

Для повышения точности измерений горизонтальной составляющей деформаций земной поверхности впервые в нашей стране, на Камчатке, был применен светодальномер - рефрактометр. Долговременные измерения дистанций этим светодальномером показали, что его точность наблюдений не хуже $1-2 \cdot 10^{-7}$. При проведении очередной серии наблюдений из обсерватории “Мишенной” нами была зарегистрирована деформационная волна [3]. Ближайшее по времени к данному явлению было Олюторское землетрясение 8.03.1991 $M=7.0$ и удаленное от обсерватории “Мишенная” на 1050 км. Благодаря высокой точности светодальномера-рефрактометра были выделены моменты вступления деформационной волны в район наших наблюдений, что позволило определить ее скорость, которая составила 40 км/час. Это пока единственный случай определения скорости деформационной волны, возникшей от землетрясения.

С 1994 года в процесс мониторинга наблюдений за СДЗК были включены скважинные деформометр и наклономер конструкции Исиа. Деформометр представляет собой не извлекаемый трехкомпонентный датчик, который установлен в скважине глубиной 30 метров. Чувствительность деформометра $5 \cdot 10^{-8}$, накломера - 0.1 мкр, что позволяло нам регистрировать, как приливные волны (рис.8), которые имеют амплитуду порядка 0.05 ppm и 1 мкр соответственно, так и деформационные сигналы, связанные с землетрясениями различной магнитуды и на разном расстоянии (D) от места установки нашего прибора. Это Шикотанское землетрясение (6) 04.10.1994, $M_w=8.3$ ($D=1325$ км) (рис.9), Нефтегорское землетрясение (7) 27.05.1995 $M_w=7.5$ ($D=1063$ км) (рис.10), Курильское землетрясение (8) 03.12.1995 $M_w=7.9$ ($D=1154$ км) (рис 11), землетрясение (9) 31.12.1995 $M_w=5.8$ ($D=161$ км) и Карымское землетрясение (10) 1.01.1996 $M_w=6.3$ ($D=108$ км) (рис12).

Из данных наблюдений скважинным деформометром, видно, что как правило направление тензора деформаций совпадает с нодальной плоскостью фокального механизма землетрясений. Практически все зарегистрированные деформации упругие,

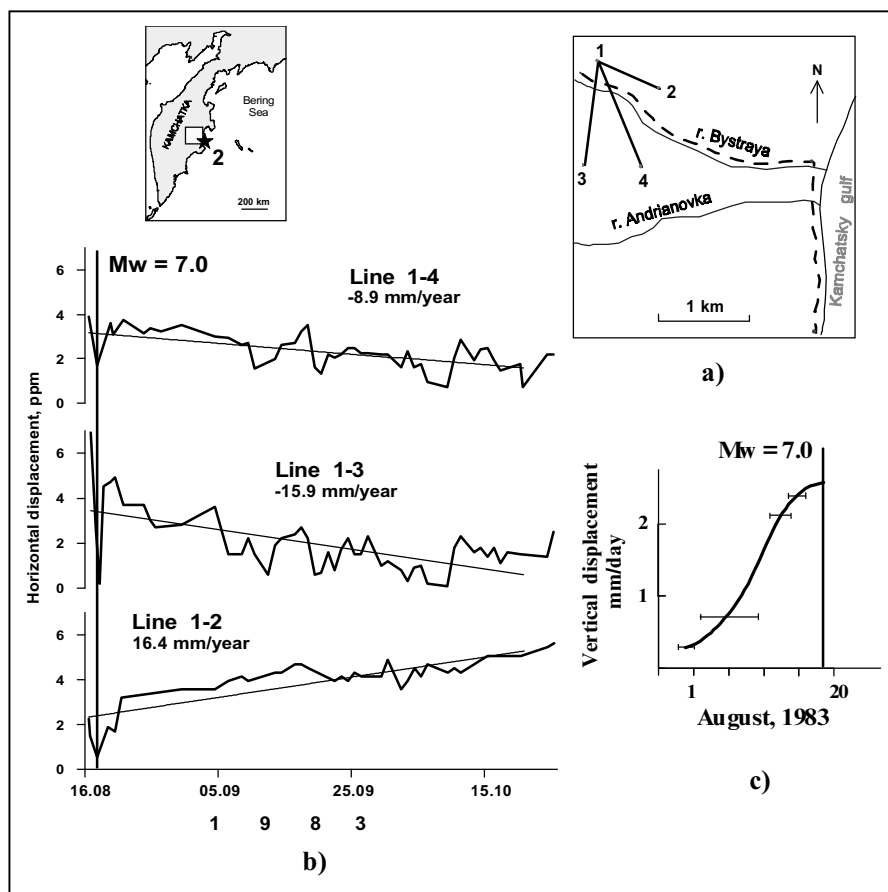


Рис 6. Горизонтальные и вертикальные смещения в эпицентральной зоне землетрясения 17.08.1983 $M_w=7.0$.

a) – полигон “Быстрая”. Цифрами отмечены пункты линейных измерений. Пунктирная линия – нивелирный ход. b) – график горизонтальных смещений. c) – график вертикальных смещений.

Fig. 6. Horizontal and vertical displacements in the epicentral zone of the 08.17.1983 $M_w=7.0$ earthquake.

a) – “Bystraya” ground. Linear measurements are numbered. Dotted line - leveling line; b) – horizontal displacements chart c) - vertical displacements chart.

кроме одного, связанного с землетрясением (9) (рис. 12), что в данном случае, скорее всего, определяется локальными процессами в самой скважине и это говорит о необходимости создания сети из 3-4 скважинных деформографов в районе Авачинского залива.

Новый этап развития наших исследований по изучению СДЗК начался после создания Камчатской GPS сети станций (KAMNET) [9]. KAMNET включает в себя постоянные (перманентные) и мобильные станции, которыми проводятся измерения в эпицентральных зонах землетрясений и в районах активных вулканов (рис. 2). Первые измерения с использованием мобильных GPS станций были выполнены на 8 пунктах Петропавловск – Авачинского полигона, которые были совмещены с пунктами светодальномерных измерений [15].

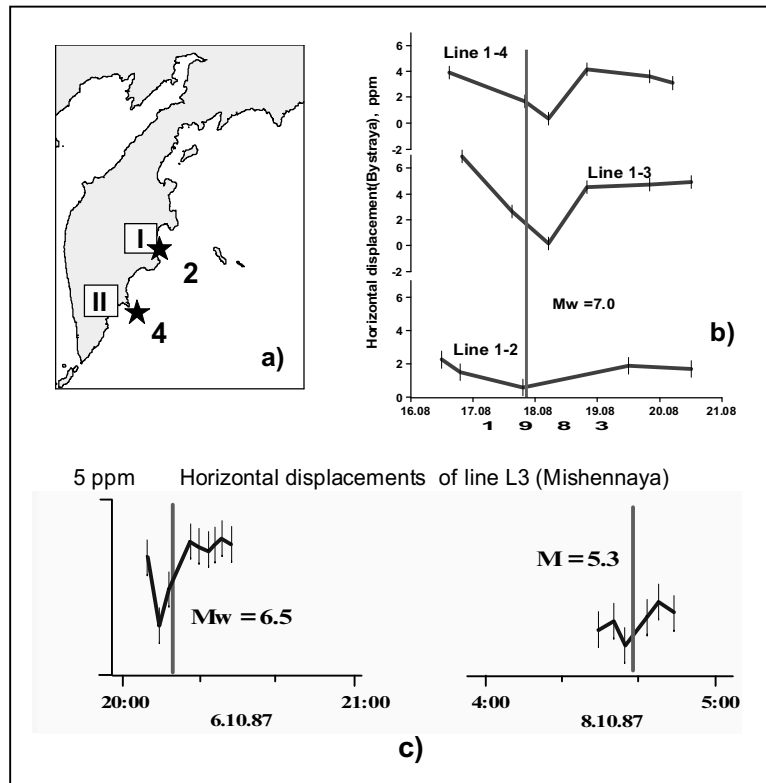
С помощью KAMNET были зарегистрированы смещения пунктов связанные с землетрясением (11) 05.12.1997 $M_w=7.8$ [9] и землетрясением (12) 5.12.2003 $M_w=6.6$ (рис. 3). Косейсмические деформации крупного субдукционного межплитового землетрясения 05.12.1997 $M_w=7.8$ хорошо согласуются с векторами, рассчитанными по дислокационной модели с использованием опубликованного Гарвардского CMT решения (рис. 14) [17,18]. На отдельных станциях KAMNET особенно станции KBG, мы наблюдали, как постфактум, аномальные подвижки амплитудой до 20 мм за месяц до землетрясения, которые можно рассматривать, как среднесрочный геодезический предвестник [9]. При землетрясении (12) 5.12.2003 с $M_w=6.6$ мы также зарегис-

Рис.7. Горизонтальные смещения, связанные с сильными землетрясениями на полигонах “Быстрая” (I) и “Мишенная” (II).

а) — положение полигонов на полуострове Камчатка; б) — смещения на полигоне “Быстрая” (схема линий на рисунке 6); в) — смещения на полигоне “Мишенная” (схема линий на рисунке 5).

Fig.7. Horizontal displacements related to strong earthquakes on the “Bystraya” (I) and “Mishennaya” (II) grounds.

а) — dislocation grounds on Kamchatka; б) — displacements on the “Bystraya” ground (lines are shown on fig. 6); в) — displacements on the “Mishennaya” ground (lines are shown on fig. 5).



тировали косейсмические деформации на ближайшей к эпицентру землетрясения GPS станции ВКИ. GPS вектор смещений хорошо согласуется с вектором, рассчитанными по дислокационной модели (точечный источник) с использованием опубликованного Гарвардского СМТ решения (рис. 14). Величина модуля вектора смещений равна 22 мм. Анализ временного ряда GPS измерений на пункте ВКИ (рис. 15) перед землетрясением 5.12.03 не выявил вариаций смещений (предвестников) подобных тем, которые были перед Кроноцким (11) землетрясением 5.12.1997 [9].

По данным GPS сети с 1996 - 2003 определены средние скорости современных движений земной поверхности. На рис. 16 приведены горизонтальные и вертикальные скорости движения пунктов сети KAMNET.

Наблюдаемые скорости смещений (деформаций) района Авачинского залива (PETP, NALY, KORC) (врезка рис. 16) подтверждают величину скорости деформации (сжатие района) в крест сейсмофокальной зоны, определенную нами по результатам светодальномерного мониторинга и она также составляет порядка 0.1 ppm/год.

Наблюдаемое растяжение района Авачинского залива вдоль сейсмофокальной зоны в период 2001-2003 гг. (рис. 5) может служить индикатором начала изменений напряженно — деформированного состояния среды исследуемого района. Наблюдается уменьшение скорос-

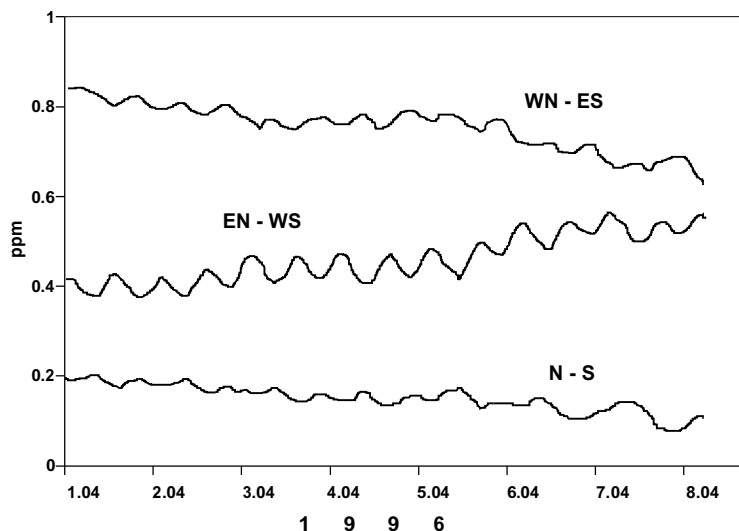


Рис.8. Приливные деформации зарегистрированные скважинным деформографом.

Fig. 8. Tidal deformations observed by a borehole strainmeter.

Рис.9. Горизонтальные пре-сейсмические и косейсмические деформации, зарегистрированные скважинным деформографом, от Шикотанского землетрясения.

Fig. 9. Horizontal preseismic and co-seismic deformations from the Shicotan earthquake, observed by a borehole strain-meter.

тей смещений с юга на север по восточному побережью Камчатки (рис. 16). Резкое уменьшение величины модуля векторов происходит между Камчатским полуостровом (КВГ) и Оссорой (Восточно-Камчатский сегмент). На основании этого факта и распределения сейсмичности в данном районе, можно предположить наличие в этом районе границы между Северо-Американской и Евро-Азиатской плитами. Для точного определения этой границы, т.е. “северной судьбы” Берингоморской и Тихоокеанской плит надо провести дополнительные GPS наблюдения в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Зарегистрированные движения со средней скоростью $V=20$ мм/год южной части полуострова Камчатка (рис. 16) примерно одинаковой для восточного и западного побережья позволяют предположить, что выделяется особая геологическая структура (Южно-Камчатский сегмент), которая активно взаимодействует с Охотоморской плитой. Дополнительные GPS измерения вдоль Курильской островной дуги позволят определить границы Тихоокеанской и Охотоморских плит (Курильский сегмент). Измеренные вертикальные скорости (рис. 16) позволяют сделать заключение, что Восточное побережье Камчатки поднимается со средней скоростью $V=20$ мм/год. Скорости горизонтальных и вертикальных деформации на полуострове Камчатка уменьшаются с востока на запад до 5 мм/год. Как для вертикальных, так и для горизонтальных смещений зона Центральной камчатской депрессии служит границей величин и направлений скоростей смещений СДЗК. Следует напомнить, что ошибки определения вертикальной компоненты при GPS измерениях в 2-3 раза больше, чем горизонтальной. Изменения направления скоростей СДЗК и их модулей в районе Центральной Камчатской депрессии (ESSO, KLU) может определяться еще и тем, что пункт (ESSO) расположен в зоне, где есть гидротермальные системы, а движение GPS пункта (KLU) определяется суперпозицией, как тектонических деформаций от зоны субдукции, так и локальных деформаций от Ключевской группы вулканов. Для решения задачи разделения движений на составляющие необходимо уплотнить сеть GPS станций в этих районах.

СДЗК и вулканы Камчатки

Наличие на полуострове Камчатка действующих вулканов вносит дополнительную сложность в изучение СДЗК в связи с сейсмичностью зоны субдукции, так как в период вулканической активности возникают локальные деформации вблизи действующих вулканов. Возникает задача разделения подвижек на вулканическую и сейсмическую

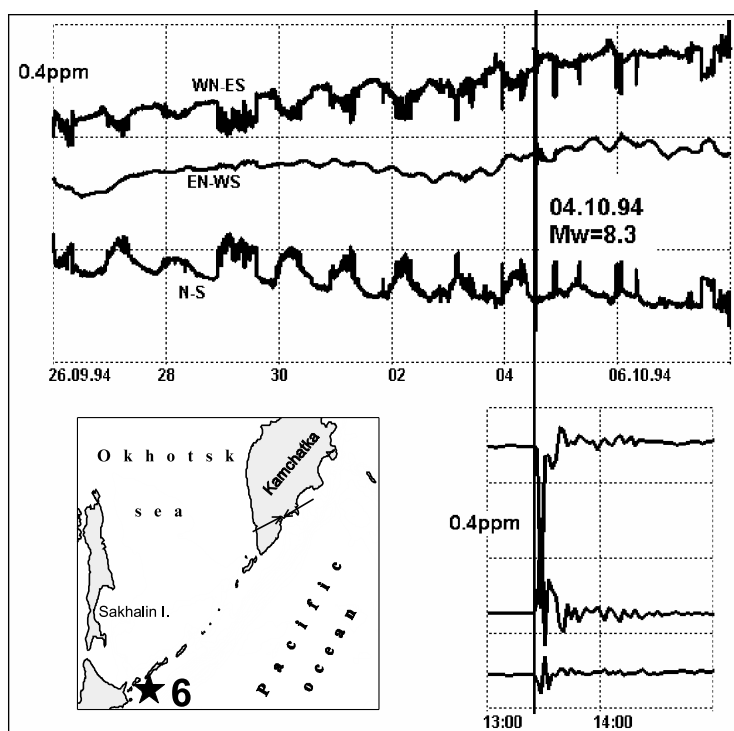
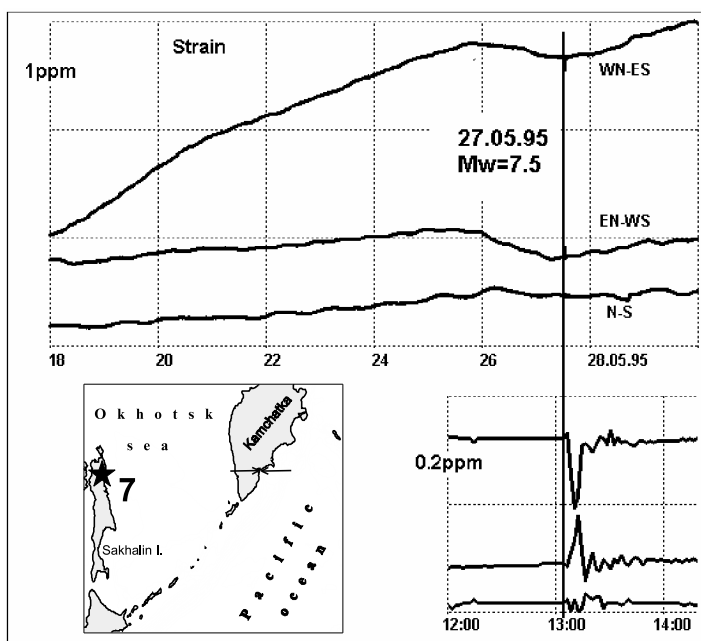


Рис.10. Горизонтальные пре-сейсмические и косейсмические деформации, зарегистрированные скважинным деформографом от Нefтегорского землетрясения.

Fig. 10. Horizontal preseismic and coseismic deformations from the Neftegorsk earthquake, observed by a bore-hole strain-meter.



части. Классическим примером изучения СДЗК на вулкане были работы на БТТТИ 1975-1976 годов [5]. Полученные результаты наблюдений за СДЗК при всех фазах вулканического процесса позволили впервые сделать оценки отдельных физических величин вулканического процесса как то величин избыточного давления (P), которая при всей грандиозности самого процесса извержения оказалась весьма скромной и составляла $P=100 \text{ кг/см}^2$ [16]. Построенная модель по данным горизонтальных подвижек [10] достаточно хорошо определяло положение источников деформаций (магматических очагов) данного извержения. Последующими инструментальными наблюдениями за СДЗК в данном районе были определены скорости и остаточные деформации поствулканического процесса района БТТИ [11].

При изучении СДЗК с использованием светодальномеров во время извержения Авачинского вулкана, происшедшего 13 января 1991 года, были получены такие данные: горизонтальных деформаций вдоль линий, превышающих ошибку наблюдений, до начала извержения зарегистрировано не было; последующие наблюдения по вееру светодальномерных линий в период самого извержения регистрировали деформации до

$3 \cdot 10^{-6}$. По отсутствию сейсмической подготовки данного извержения можно предполагать, что не было движения магмы из глубин в периферический очаг и поэтому и не было деформационных предвестников данного извержения.

Наиболее последовательное изучение СДЗК на вулкане — это работы в Карымском вулканическом центре. Здесь, начиная с 1972 года, проводятся все

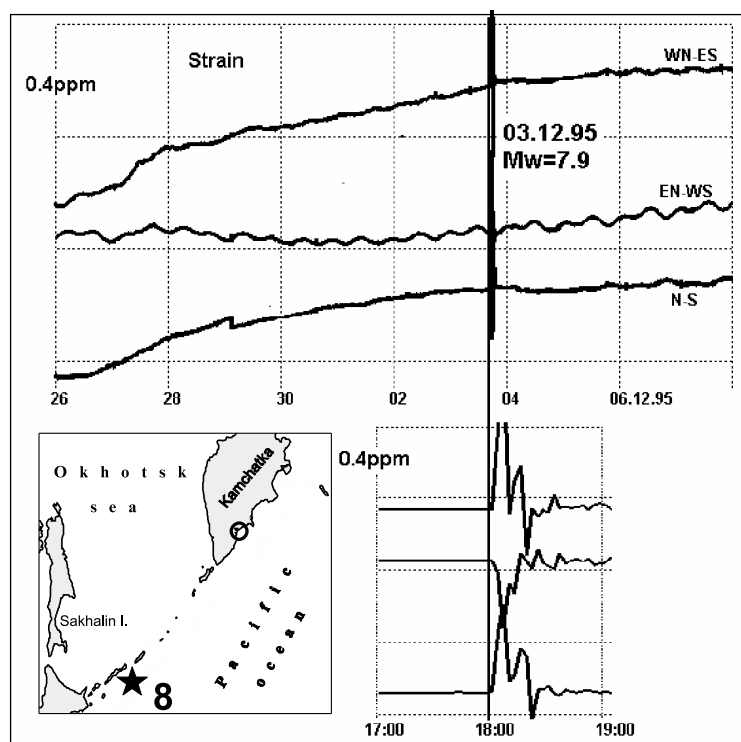


Рис.11. Горизонтальные косейсмические деформации, зарегистрированные скважинным деформографом, от Курильского землетрясения.

Fig. 11. Horizontal preseismic and coseismic deformations from the Kurila earthquake, observed by a bore-hole strain-meter.

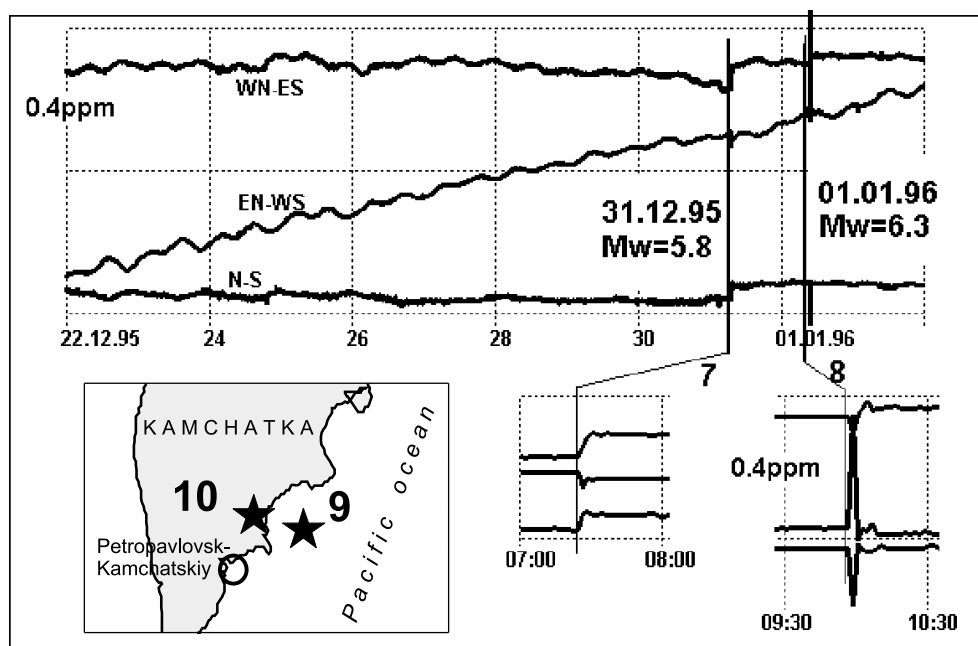


Рис.12. Горизонтальные деформации, зарегистрированные скважинным деформографом, от землетрясении 9 (31.12.1995, $M=5.8$) и 10 (01.01.1996, $M=6.3$).

Fig. 12. Horizontal deformations from the 9 (12.31.1995, $M=5.8$) and 10 (01.01.1996, $M=6.3$) earthquakes, observed by a borehole strainmeter.

виды геодезических работ [12]. В данной работе мы остановимся на исследовании последних событий произошедших в Карымском вулканическом центре — это землетрясение (10) 1.01.1996 г. $M_s=6.3$ и извержения вулканов Карымский и Академии Наук.

События 1-2 января 1996 года включали 2 вулканических извержения и одно сильное землетрясение. Приведем более детальный ход событий:

1. Рой микроземлетрясений под постройкой вулкана (его юго-восточной частью) на глубине около 3 км (начался ~ 02^h 1 января UT). Продолжался в течение нескольких часов (не менее четырех), более определенно сказать трудно, т.к. после ~ 06^h 1 января UT записи отдельных микроземлетрясений выделить было невозможно.

2. Рой форшоков (начался ~ 06^h 1 января UT) в очаговой области сильного землетрясения, эпицентры которых распространялись с севера (от озера Карымское) на юг приблизительно на 15 км, захватывая полосу такой же ширины.

3. Извержение из центрального кратера Карымского вулкана. Точный момент извержения неизвестен (в пределах 02^h - 10^h 1 января UT). С тех пор извержение продолжается. Объем изверженных материалов в 1996 году составил $1.6 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ [13].

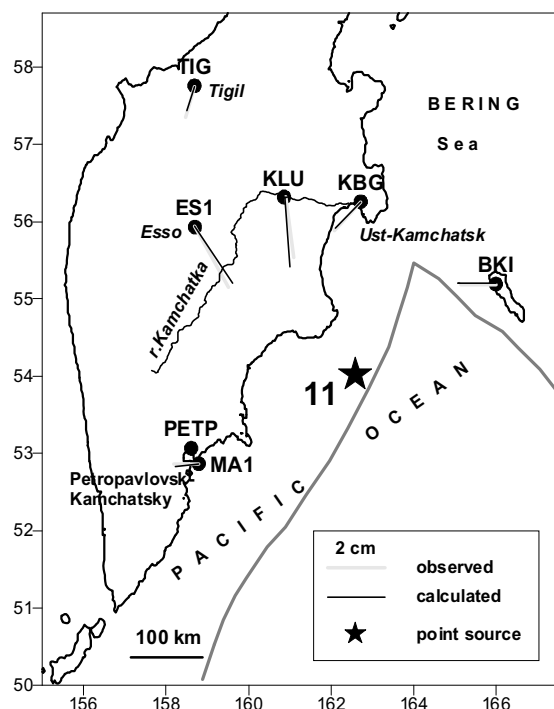
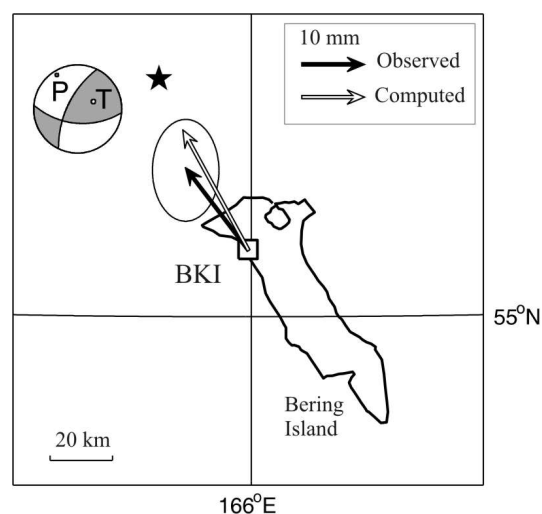


Рис. 13. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных горизонтальных векторов косейсмического скачка Кроноцкого (11) землетрясения 05.12.1997, $M_w=7.8$.

Fig. 13. Comparison of the observed and calculated vectors of horizontal coseismic jump from the Kronotskoe 11 earthquake (12.05.1997, $M_w=7.8$).

Рис.14. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных горизонтальных векторов косейсмического скачка при землетрясении 05.12.2003, $M_w=6.6$. Расчет сделан для точечного источника в упругом полупространстве с использованием СМТ решения для тензора сейсмического момента (на рисунке показан наилучший двойной диполь). При расчете для модуля сдвига принято значение $\mu=2,9 \times 10^{10}$ Н $\times$ м ($\lambda=\mu$). Вертикальные смещения также согласуются (наблюдения: -4,1 мм, расчет: -2,5 мм).

Fig. 14. Comparison of the observed and calculated vectors of horizontal coseismic jump from the 12.05.2003, $M_w=6.6$ earthquake. Calculations were done for the point source in elastic half-space, using CMT solution for the seismic moment tensor (figure displays the best double dipole). The value of $\mu=2,9 \times 10^{10}$ Н $\times$ м ($\lambda=\mu$) was used for the displacement module calculations. Vertical displacements are also in agreement (observed: -4.1 mm; calculated -2.5mm).



4. Сильное землетрясение к югу от Карымского вулкана в 9 часов 57 мин UT. Магнитуда землетрясения $M_s=6.7$. Инструментальный эпицентр землетрясения располагается в пределах форшокового роя - "Е" (рис. 17).

5. Извержение из Нового Эруптивного Центра (НЭЦ), образовавшегося в Карымском озере, в кальдере вулкана Академия Наук, вблизи ее северного края. Точный момент извержения неизвестен (в пределах 12^h 1 января UT - 0^h 2 января UT). Извержение продолжалось в течение 20 часов. Объем изверженных материалов составил $4.0 \cdot 10^7$ м³ [13]. Последнее извержение вулкана Академия Наук было 25 тыс. лет назад.

Для реконструкции источников упругих деформаций были использованы относительные смещения геодезических пунктов в период между двумя эпохами определения их координат. Эпоха 1: 1972 - 1995 гг., когда измерения выполнялись светодальномерами и теодолитами. Погрешность измерения расстояний светодальномерами определялась выражением $\pm (2 \text{ мм} + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-6} D)$, где D — измеренное расстояние в мм, а превышения определялись в лучшем случае с погрешностью первых дециметров [12]. Эпоха 2: август 1996 - 2000 гг., когда наблюдения выполнялись GPS системам и расстояния между пунктами

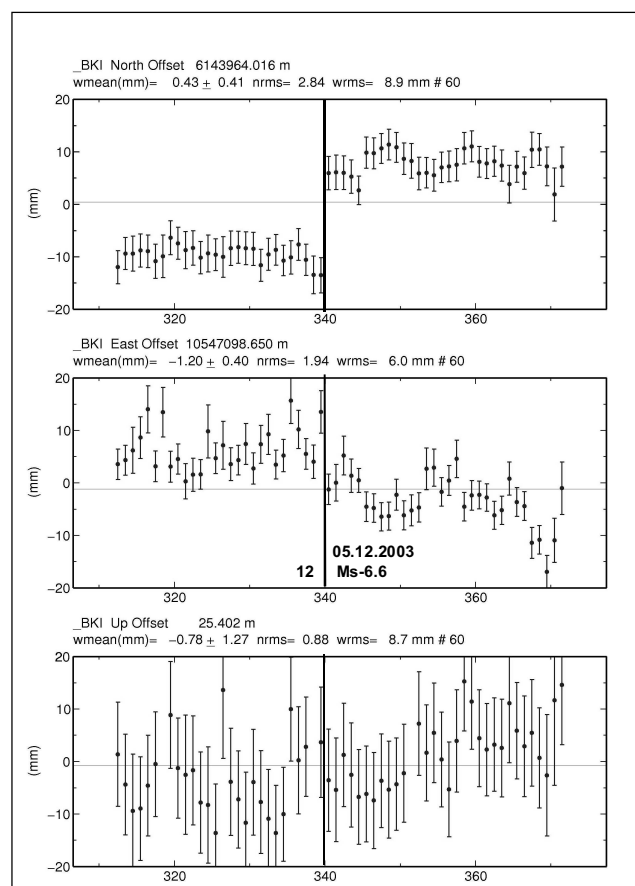


Рис. 15. Смещение пункта BKI в системе ITRF2000, связанное с землетрясением 05.12.2003 г.

Fig. 15. BKI point displacements in the ITRF2000 system related to the 12.05.2003 earthquake.

Рис. 16. Скорости смещения пунктов Камчатской GPS сети относительно MAG0. На врезке смещения относительно ПЕТР. Стрелка PAC_NAM показывает направление движения плит.

Fig. 16. Rates of displacement of Kamchatkan GPS network relative to MAG0. Inset shows displacements relative to PETP. Arrow PAC_NAM shows plate movement direction.

определялись с погрешностью лучше, чем $1 \cdot 10^{-6} D$ и превышения между ними с погрешностью не хуже ± 10 см.

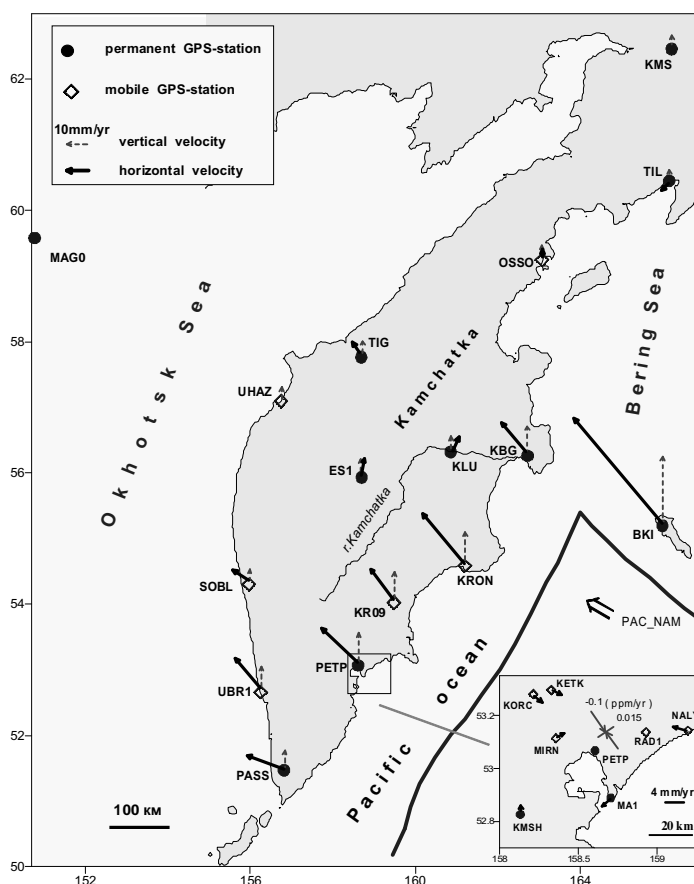
Предполагаем, что в пределах каждой эпохи координаты пунктов изменялись незначительно, а изменения, связанные с событиями и их подготовкой, произошли в течение 6 месяцев, с сентября 1995 по февраль 1996 года. Другими словами, магма в дайке под озером поднялась с глубины 8-10 километров за время не более чем 3-4 месяца. Для расчетов использовались только горизонтальные смещения, т.к. ошибки вертикальных смещений для эпохи 1 недопустимо велики.

Интерпретация геодезических данных велась в предположении следующей модели деформационных источников. Считалось, что горизонтальные смещения геодезических пунктов порождены четырьмя индивидуальными источниками статических деформаций, возникшими в указанный период: двумя дайками D1, D2, сферическим магматическим очагом S и статическим очагом землетрясения E (рис. 17). В качестве математических моделей этих источников были приняты: для даек – прямоугольные отрывные дислокации, для сферического магматического очага – центр расширения/сжатия и для статического очага землетрясения – прямоугольная сдвиговая дислокация. Полагаем, что источники действуют в однородном упругом полупространстве с параметрами Ламе λ , μ , причем $\lambda = \mu = 1.1 \cdot 10^{10}$ Н/м². Это значение соответствует скорости продольных волн $\alpha = 3.5$ км/с и плотности $\rho = 2.6$ т/м³. Более детальные модели индивидуальных источников следующие.

Дайка D1 представляет собой отрывную дислокацию, по форме это близкая к вертикальной прямоугольная площадка с горизонтальной длиной $L1$ и вертикальной длиной $W1$. Положение площадки задается координатами ее центра, а ориентация – азимутом и углом падения. Интенсивность дислокации характеризуется ее раскрытием $U1$ (скачком смещения по нормали к площадке).

Дайка D2 вводится аналогично дайке D1, ее параметры обозначены $L2$, $W2$, $U2$.

Сферический магматический очаг S моделируется точечным источником расширения/сжатия и характеризуется пространственными координатами и либо интенсивностью M_s (скалярным “сейсмическим” моментом), либо избыточным объемом $\Delta V = M_s / (\lambda + 2\mu)$. Для наглядности можно полагать, что действие центра расширения/сжатия эквивалентно радиальному смещению U_s поверхности некой условной сферы, радиус R_s которой выбран произвольно ($R_s = 3$ км). Величина радиального смещения U_s поверхности условной сферы связана с интенсивностью M_s зависимостью: $U_s = M_s /$



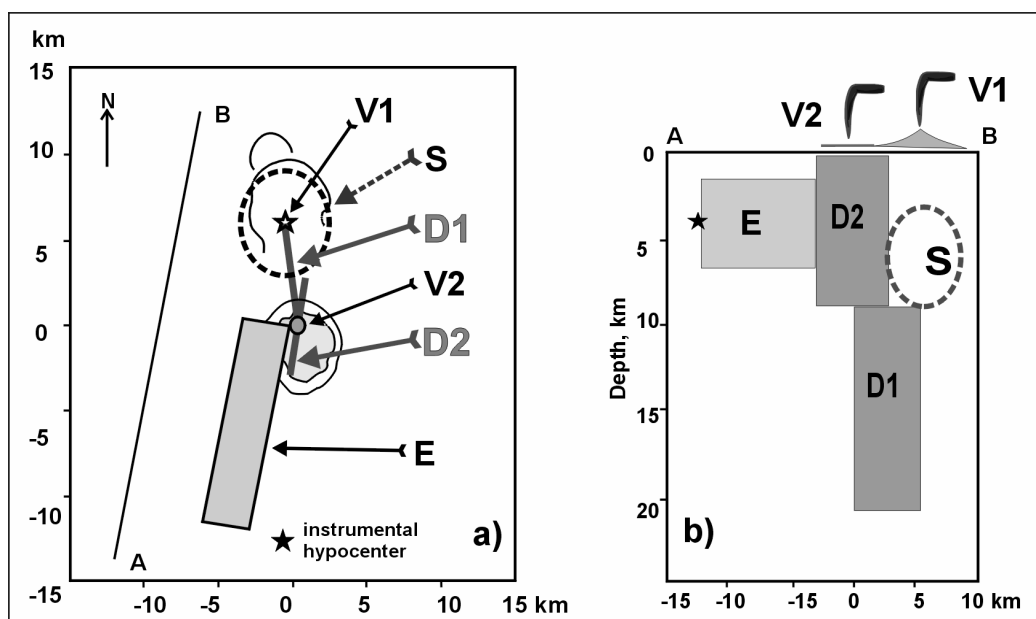


Рис. 17. Модель деформационных источников на вулкане Карымский, связанных с подготовкой извержения 01.01.1996 года.

a) – схема деформационных источников. b) – разрез по линии A-B; D1, D2 – дайки; V1, V2 – центры извержений; S – сферический магматический очаг; E – статический очаг землетрясения.

Fig. 17. Model of the Karymskiy volcano deformation sources, related to a preparation of the 01.01.1996 eruption.

a) – deformation sources; b) – crosssection along A-B line; D1, D2 – dikes; V1, V2 – eruption centers; S – spherical magmatic source; E – static source of earthquake.

$[4\pi(\lambda+2\mu)R_s^2]$. Заметим, что изменение объема, порождаемое смещением U_s , равное $\Delta V = U_s \cdot [4\pi R_s^2] = M_s / (\lambda+2\mu)$ не зависит от конкретного значения R_s .

Источник землетрясения E – сдвиговая дислокация с постоянным вектором скачка смещения в пределах прямоугольной площадки, имеющей горизонтальную длину L и ширину W. Положение площадки задается координатами ее центра, а ориентация – азимутом и углом падения. Скачок смещения лежит в плоскости дислокации и характеризуется своими компонентами: горизонтальной U_L (вдоль простирания) и U_W (вдоль падения). Заметим, что поскольку наблюдательные данные отражают изменение тектонической обстановки, которое накопилось между двумя эпохами измерений, то величины скачков смещений U_1 , U_2 и смещения U_s выражают лишь относительные изменения интенсивностей источников D1, D2, S. Для очага землетрясения E это значит, что скачок

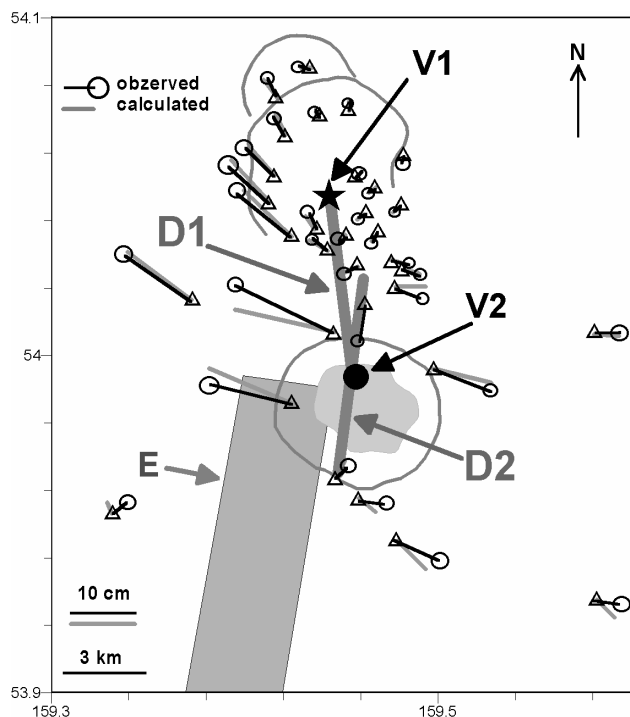


Рис. 18. Результаты моделирования источников деформаций по геодезическим данным.

Fig. 18. Results of the modeling of deformation sources based on geodetic data.

смещения наряду с быстрой (сейсмической) может содержать также медленную составляющую (afterslip).

Значения параметров модели определялись в результате процедуры минимизации суммы квадратов невязок горизонтальных смещений. При этом параметры были разбиты на две группы. Для первой группы параметров использовался метод проб и ошибок. Для второй группы параметров, значения определялись линейной МНК инверсией. К первой группе относятся параметры, характеризующие положение и ориентацию источников. Вторую группу параметров составляют параметры, характеризующие интенсивность источников. А именно, для даек D1 и D2 – это значения U_1 и U_2 , для центра расширения/сжатия S – смещение U_s , а для очага землетрясения E – компоненты U_L и U_W скачка смещения.

С учетом геологической обстановки и наблюдений, были приняты следующие априорные ограничения на значения параметров первой группы.

Дайка D1 – вертикальна и в плане соединяет кратер Карымского вулкана с НЭЦ. Дайка D2 – вертикальна и в плане проходит вблизи НЭЦ. Точечный источник S находится под кратером Карымского вулкана. Очаг землетрясения E находится вблизи инструментального эпицентра. Для дайки D1 относительное изменение раскрытия составило $U_1 = -2.3 \pm 1.7$ м, а изменение объема $\Delta V_1 = -18 \cdot 10^7$ м³. Изменение объема ΔV_1 получилось отрицательным. Это значит, что объем дайки D1 уменьшился на величину $-\Delta V_1$. Сжимаемость материала, по-видимому, не слишком велика и этот объем должен был куда-то переместиться. Так как верхняя сторона дайки D1 находится на глубине 8 километров, то материал не мог выйти на поверхность.

Для дайки D2 относительное изменение раскрытия составило $U_2 = 3.2 \pm 0.2$ м, а изменение объема $\Delta V_2 = 15 \cdot 10^7$ м³. Объем дайки D2 увеличился на величину ΔV_2 . Величина раскрытия $U_2 = 3.2$ м для дайки D2 находится в хорошем согласии с раскрытием отрывных трещин, обнаруженных на поверхности к северу от Нового Эруптивного Центра до 2.5 м. Величина $\Delta V_1 + \Delta V_2$ – суммарное изменение объема даек D1 и D2 – равна $-3 \cdot 10^7$ м³ может быть интерпретирована как объем материала вышедшего из недр на поверхность. При этом можно думать, что магма перетекала из дайки D1 в дайку D2 (т.е. дайка D2 росла, продвигаясь к поверхности, за счет подпитки из дайки D1) и частично изливалась из НЭЦ. Полученная по модели оценка объема изверженных из НЭЦ материалов ($3.0 \cdot 10^7$ м³) сопоставима с оценкой $4.0 \cdot 10^7$ м³, приведенной в работе [13].

Значение смещения U_s для источника S получилось отрицательным. Это значит, что источник S является центром сжатия. Изменение объема для S оказалось равным $-1.0 \cdot 10^7$ м³. То есть объем магматического очага уменьшился на величину $1.0 \cdot 10^7$ м³. Эта величина сопоставима с оценкой объема пород ($1.6 \cdot 10^7$ м³), изверженных из кратера вулкана Карымский за 1996 год, приведенной в [13].

Оценки параметров землетрясения были частично проверены по сейсмологическим данным. А именно, для очага землетрясения с полученными параметрами были рассчитаны широкополосные сейсмограммы на станции РЕТ, расположенной в Петропавловске-Камчатском на расстоянии 110 км от инструментального эпицентра. Расчеты проводились для слоистого упругого полупространства. Протяженный очаг моделировался горизонтальной линией, азимут простирания которой и длина совпадают с полученными для статического очага значениями, а глубина равна глубине центра площадки очага. Предполагалось, что разрыв в виде бегущей ступеньки распространяется с юга на север. В пользу такого предположения говорит близость инструментального эпицентра к южной стороне площадки очага.

Предложенная модель в виде четырех источников (рис. 17) дает хорошее согласие с горизонтальными смещениями геодезических пунктов (рис. 18).

1. Суммарное изменение объемов источников D1 и D2 дает оценку объема изверженных из НЭЦ материалов сопоставимую с литературными данными.

2. Изменение объема источника S дает оценку объема изверженных из Карымского вулкана материалов сопоставимую с литературными данными.

3. По геодезическим данным определен механизм и моментная магнитуда ($M_w=6.3$) Карымского землетрясения 1.01.1996 г. Эти определения подтверждаются сравнением синтетических и наблюдаемых широкополосных трехкомпонентных сейсмограмм на станции РЕТ.

Заключение

Подведем итоги работ по инструментальному изучению СДЗК на Камчатке более чем за 30 лет и предложим наше видение развития методов наблюдений, которые надо развивать и привлекать к исследованию данной проблемы.

На 2003 год результаты реализации нашей долгосрочной программы изучения СДЗК на Камчатке следующие:

1. На Камчатке в процессе своих исследований СДЗК и как части данной проблемы, поиск деформационных предвестников землетрясений и извержений, мы используем наиболее “продвинутые” технологии. Благодаря этому, нам удалось зарегистрировать деформации, связанные с землетрясениями и вулканическими извержениями, определить физические характеристики и построить модели деформационных процессов при таких природных явлениях, как Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 годов и событий в Карымском вулканическом центре 1996-2000 гг. Зарегистрированные нами косейсмические деформации, связанные с землетрясениями в Кроноцком заливе 05.12.1997 г., $M_w=7.8$ и землетрясением вблизи острова Беринга 5.12.2003 г. $M_w=6.6$, находятся в хорошем согласии с теми значениями, которые получаются при вычислении по дислокационной модели, использующей опубликованное Гарвардское решение для тензора момента. Этот факт имеет очень важное значение, т.к. с одной стороны он подтверждает надежность всей нашей системы измерений и, особенно, хорошую точность GPS данных, а с другой стороны, что и само Гарвардское решение для тензора момента является надежной оценкой истинного сейсмического тензора момента очага землетрясения.

2. Созданная нами система наблюдений за СДЗК, в которую с 1996 вписалась сеть GPS станций, позволяет нам решать такие геодинамические задачи как:

- определять скорости и величины деформационных процессов всего Камчатского полуострова и Командорских островов,
- измерить величины и скорости накопления деформаций в сейсмоактивных районах;
- измерить тектоническую активность крупных геологических структур Камчатки;
- определять границы плит и в последствии перейти к задаче выявления современных движений, связанных с развитием островных дуг.

Чем и как дальше изучать СДЗК на Камчатке? В космическую эпоху, как уже говорилось ранее, основным методом был трилатерационный с использованием светодальномеров (геодиметров) и светодальномеров - рефрактометров (терраметров). Надо сказать, что хотя теперь все внимание исследователей занимающихся изучением СДЗК обращено к GPS, дальнометрия до сих пор продолжает использоваться в научных исследованиях по проблеме прогноза землетрясений. И эта тенденция сохранится, так как для расстояний порядка 5-10 км дальнометры-рефрактометры обеспечивают не только высокую точность измерения горизонтальной компонент деформаций — вплоть до $5 \cdot 10^{-8}$, но и обеспечивают получение информации в более короткие интервалы времени, вплоть до 5-15 минут, что пока проблематично для GPS. Уязвимая сторона лазерной дальнометрии — необходимость оптической видимости, т.е. не всепогодность. Что касается вертикальной компоненты деформаций, то приходится признать, что в оптическом диапазоне она может быть обеспечена пока только геометрическим нивелированием. Тригонометрическое нивелирование — измерение верти-

кального угла на расстояниях 5-10 км не обеспечивает точности из-за влияния рефракции, и пока нет перспективы инструментального определения угла рефракции с надлежащей точностью (0.1"). Представляется, что нет перспектив применения при изучении деформационных предвестников землетрясений у наклономеров, т.к. при весьма высокой инструментальной точности им свойственна нестабильность показаний и существенное воздействие на показания атмосферных фронтов. Как показывает наш опыт работы, имеются перспективы у скважинных деформометров, если создать сеть из 3-4 приборов.

В последние годы возросло применение спутниковых радиointерферометров (INSAR) для целей изучения постсейсмических деформаций. Кратко работу такого интерферометра можно описать следующим образом. На носителе (ИСЗ, самолет, вертолет) установлен передатчик, могущий сканировать местность, чаще всего перпендикулярно к линии полета ("боковой обзор") в некотором угле 24°-30°, перекрывая полосу в первые сотни километров. Отраженный пучок принимается на две разнесенные антенны – базу интерферометра. Измерительное устройство включает в себя импульсный дальномер (пикосекундный) и фазометр, измеряющий разность расстояний, идущих от точки отражения до концов базы интерферометра. При известной измеренной высоте полета и величине базы определяется превышение точки отражения луча относительно точки надира самолета и относительные разности высот точек в процессе сканирования. При выполнении съемки в две эпохи при пост-обработке может быть нарисована интерферограмма, дающая цветное изображение изменения высот точек местности, произошедшее между эпохами съемки. Не вдаваясь в детали практической реализации этого метода, отметим его главное достоинство – INSAR позволяет изучать объекты дистанционно на больших площадях с достаточно высокой точностью вертикальные деформации (до первых сантиметров) после произошедшего землетрясения или в процессе извержения вулкана. Можно ли применять технологию INSAR для целей изучения вертикальной компоненты деформаций в процессе подготовки землетрясений покажет время. Как всегда, одной из значимых проблем в данном вопросе – это влияние рефракции радиолуча, обусловленное различными градиентами показателя преломления приземных слоев воздуха при съемке в две эпохи. В кругах специалистов известен эффект "датских Альп", обнаруженный при съемке территории Дании и обусловленный именно влиянием рефракции радиолуча. Впрочем, решение этого вопроса может быть найдено по пути совместного использования радио и светового диапазона по аналогии со спектральным методом определения геодезической рефракции: $r = k + r$; где k – известный коэффициент, $+r$ – разность рефракции для двух диапазонов волн, которая должна быть измерена инструментально в каждую эпоху. Немаловажным обстоятельством является сложность и длительность обработки данных спутникового сканирования и неизбежная дискретность получения результатов в процессе орбитального движения ИСЗ. Часть этих ограничений может быть снято при использовании лазерного диапазона, но в этом случае вступает в силу главный фактор – не всепогодность.

При наличии уже созданной нами системы наблюдений за СДЗК и развитием ее путем включение в нее новых способов наблюдений, например INSAR, а также сгущения сети GPS и скваженных деформометров в районах активных вулканов и эпицентральных зонах возможных готовящихся сильных землетрясений (районы Камчатского, Кроноцкого и Камчатского заливов) позволят нам получить новые данные о СДЗК и приблизится к построению геодинамических моделей для всей зоны сочленения Курило - Камчатской и Алеутской островных дуг.

Список литературы

1. Арманд Н.А., Бахтиаров В.Ф., Бисярин В.П., Екимовских И.А., Клебанов А.Н., Левин В.Е., Ломакин А.Н., Нестеров В.Н., Павлов Б.Н., Тараканов С.В. Двух-

- волновый лазерный дальномер-рефрактометр, Ж. "Радиотехника и электроника", вып.11 1990, с.2420-2426.
2. Бахтиаров В.Ф., Бисярин В.П., Левин В.Е. Способ определения расстояния, авторское свидетельство № 180212.
 3. Бахтиаров В.Ф. Левин В.Е. Применение светодальномеров в геодезической обсерватории "Мишенная" (Камчатка) для регистрации движений земной поверхности. Оптический журнал, №10, 1993, стр. 82-85.
 4. Бахтиаров В.Ф. Левин В.Е. Деформации земной поверхности по данным круглогодичных светодальномерных наблюдений из обсерватории Мишенная, Камчатка, с 1979 по 1985 г.г. Вулканология и сейсмология. 1989 №2.
 5. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975 – 1976 г. Монография, Изд. "Наука". 1984.
 6. Волконский В.Б., Попов Ю.В., Чижов С.А., Чирицо С.А., Яковлев В.В. Применение АИГ: ND^{3+} лазера для измерения расстояний дисперсионным методом. Квантовая электроника, том 10, №12 1983, с.2490-2492.
 7. Гусев А.А., Зобин В.В., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Усть-Камчатское землетрясение 15.XII сб. Землетрясения в СССР в 1971 году, М. Наука, 1975, с.172-184.
 8. Кириенко А. П., Золотарская С. Б. Некоторые закономерности деформаций земной поверхности Восточной Камчатки в период 1966 - 1983 гг. Вулканология и сейсмология. 1989. №2. С. 80 - 93.
 9. Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Касахара М. Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах, Вулканология и сейсмология, 2002, № 1, стр.3-11.
 10. Левин В.Е., Энман В.Б. Моделирование смещений земной поверхности вблизи новых Толбачинских вулканов за период 1971-1976, Вулканология и сейсмология, 1981, № , с.98-119.
 11. Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф. Деформации земной поверхности в районе Большого Трещинного Толбачинского. извержения 1975-1976 гг. в период 1978-2000 гг. и их возможные причины. Вулканология и сейсмология, 2003 №6, с.55-61
 12. 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, 1980, № 4, с.49-64.
 13. Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А., Двигало В.Н., Андреев В.И., Иванов В.В., Карташева Л.А., Марков И.А. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии Наук. Вулканология и сейсмология , 1997, № 5, с.38-70.
 14. Прилепин М.Т. Светомодуляционный способ определения среднего показателя преломления воздуха вдоль некоторой линии, Тр. ЦНИИГАиК, 1957, вып. 114, с. 127-130.
 15. Прилепин М.Т. Левин В.Е. Бахтиаров В.Ф., Мишин А.В., Первая эпоха измерений на Петропавловск-Авчинском полигоне (Камчатка), Фонды ИФЗ РАН, 1995.
 16. Федотов С.А., Энман В.Б., Магуськин М.А., Левин В.Е., Жаринов Н.А., Энман С.В. Деформации земной поверхности вблизи новых Толбачинских вулканов (1975-1976 гг.). В кн.: Геол. и геофиз. данные о большом трещинном Толбачинском извержении 1975-1976. М. Наука 1978, с.189-199.
 17. R. Burgmann, M.G. Kogan, V.E. Levin, C.H. Scholz, G.M. Steblov and R.W. King Rapid aseismic moment release following the 5 December, 1997 Kronotsky,

- Kamchatka, earthquake, Geophysical Research Letters, v.28, No.7, 1 April 2001, pages 1331-1333,
18. E.Gordeev, A.Gusev, V. Levin,, V.Bakhtiarov, , V.Pavlov, V.Chebrov and M.Kasahara. Preliminary Analysis of Deformations at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data, Geophys. J. Int., 147, 2001, pages189-198,
 19. A.Gusev. Temporal variations of the coda decay rate on Kamchatka: are they real and precursory? J.Geophys. Res.102, 8381-8396, 1997
 20. Hugget G.R. Two-color terrametr . Tectonophysics, 1981, v.71, N.1, pp, 29-39.
 21. Slater L.E., Hugget G.R. A Multiwavelength Distance – Measuring Instruments for Geophysical Experiments. Jornal of Geophys. Res. V.81, N 35, pp. 6299-6306.
 22. Plafker G. Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake, Science, 1965, v.148, No.3678, p.1731-1736.
 23. Raid H.F. The California earthquake of April 18, 1906, v.2. The mechanics of earthquake. The Carnegie Inst. Wash.1910.