

УДК 550.31

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ (СДЗК) НА КАМЧАТКЕ

© 2014 г. В. Е. Левин¹, В. Ф. Бахтиаров¹, Н. Н. Титков¹, С. С. Сероветников¹,
М. А. Магуськин², А. В. Ландер³

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

³Международный институт теории прогноза землетрясений и геофизики РАН, г. Москва

E-mail: nik@emsd.ru

Поступила в редакцию 05.08.2013 г.

Проводится обзор работ по геодезическому мониторингу современных движений земной коры (СДЗК) Камчатки и Командорских островов за 40-летнюю историю инструментальных наблюдений. Приводятся примеры регистрации СДЗК классическими геодезическими методами, а с 1996 года и с помощью системы спутникового позиционирования GPS. Созданная КФ ГС РАН региональная сеть GNSS-наблюдений КАМNET позволила решать задачи изучения геодинамических процессов, происходящих в области сочленения трех крупнейших плит: Евразийской, Северо-Американской, Тихоокеанской, и плит среднего размера: Охотии и Берингии. Дается интерпретация примеров регистрации СДЗК. Намечаются перспективы дальнейшего развития в области изучения геодинамики Корьякско-Камчатского региона.

DOI: 10.7868/S0002333714060040

ВВЕДЕНИЕ

Работы по исследованию современных движений земной коры (СДЗК) на Камчатском полуострове были начаты научными учреждениями Академии наук СССР (Институт физики Земли, Институт вулканологии) и Предприятием № 2 ГУГК при СМ СССР в 70-е годы XX века. Для выполнения этих работ создавались локальные научно-исследовательские полигоны, приуроченные к районам активных вулканов (Авачинский, Карымский, Толбачинский, Ключевской, Горелый, Ксудач) и эпицентральной зонам возможных мест сильных землетрясений (Авачинский залив, Кроноцкий залив, Камчатский залив) (рис. 1а). Создавались протяженные профили высокоточного нивелирования вдоль Восточного побережья Камчатки, по центральной Камчатской депрессии и перпендикулярно к Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне (рис. 1б). В 1979 году был организован светодальномерный мониторинг СДЗК в районе Авачинского залива из обсерватории “Мишенная”. Подобный светодальномерный мониторинг позднее были организованы в США (Калифорния), в Японии и в СССР на прогностических полигонах в Таджикистане (Гарм), в Киргизии (полигон ИВТАН), в Туркменистане (Ашхабад).

При изучении СДЗК на Камчатке ставились, в основном, следующие задачи:

- детальное исследование СДЗК на активных вулканах;
- изучение СДЗК, связанных с сильными землетрясениями;

– измерение СДЗК, как проявление перемещения литосферных плит [Федотов, Энман, 1973].

Работы по первым двум направлениям проводились с начала 70-х годов классическими геодезическими методами (трилатерация, нивелирование) с использованием аппаратуры наивысшей к тому времени точности. Трилатерация позволяла определять взаимное положение геодезических пунктов в плане с ошибкой 1×10^{-6} при длинах сторон 10–30 км; нивелирование – взаимное положение по высоте с ошибкой 0.5×10^{-6} .

К концу XX века точностные возможности однолучевых светодальномеров для мониторинга СДЗК, ограниченные величинами порядка 1×10^{-6} , были исчерпаны, а светодальномер-рефрактометры [Арманд и др., 1990] с точностью 1×10^{-7} в России не вышли из стадии макетных разработок. Стал наблюдаться некоторый кризис в развитии исследований СДЗК. Но в это же время стали стремительно развиваться Глобальные Навигационные Спутниковые Системы GNSS (Global Navigation Satellite Systems), сначала GPS, а теперь и ГЛОНАСС, и для проведения дальнейших исследований на Камчатке и Командорских островах был совершен переход на использование этих систем.

Уже первые опыты использования GPS в геодезических целях, проведенные в первой половине 90-х годов, показали, что новые технологии позволяют определять взаимное расположение удаленных на сотни километров пунктов с точностью $\pm 2-3$ см при значительной экономической эффективности. К середине последнего десятилетия прошлого века многие зарубежные фирмы

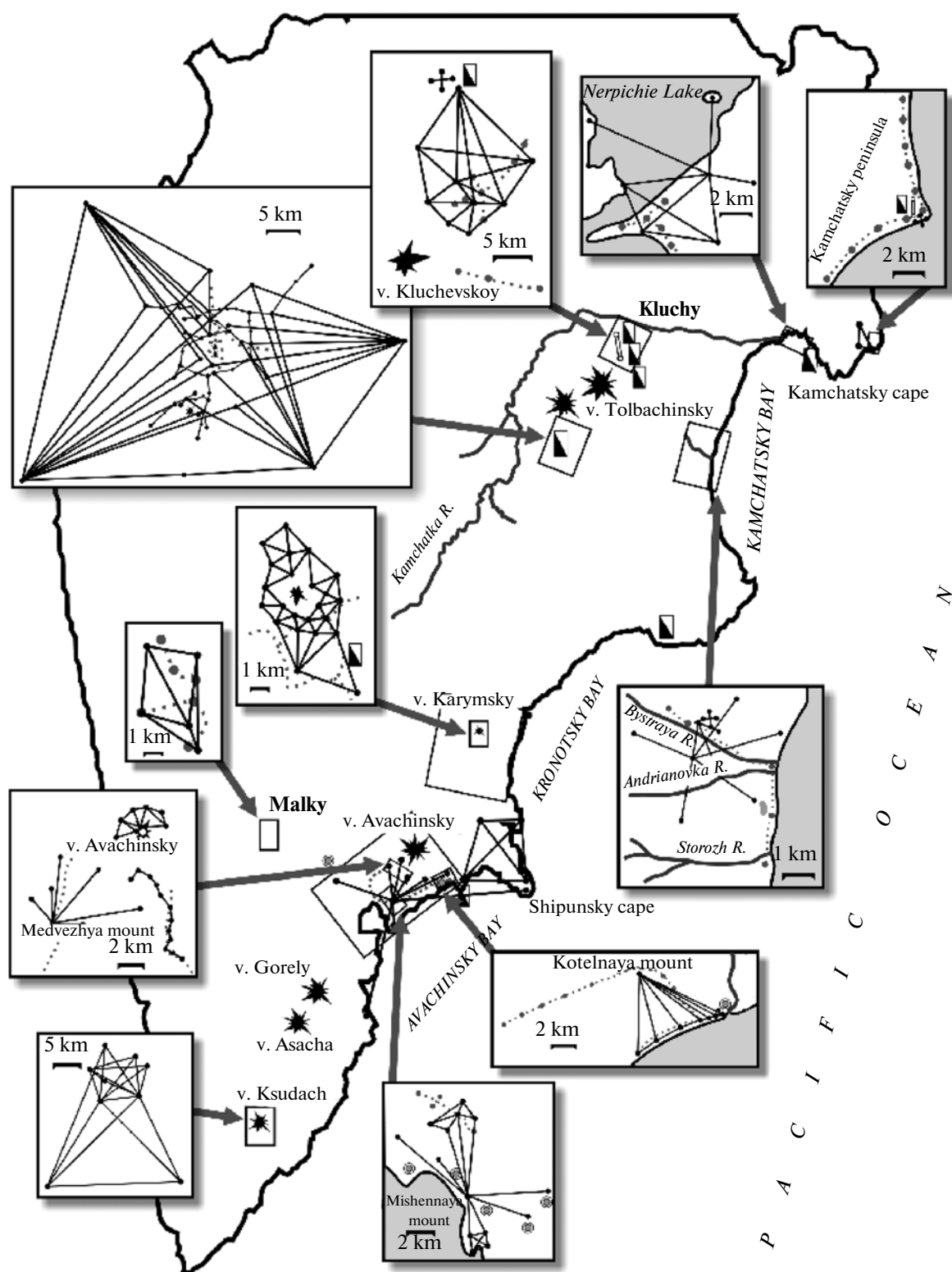


Рис. 1. Схема расположения на Камчатке научно-исследовательских локальных полигонов и профилей высокоточного нивелирования, созданных Институтом вулканологии ДВО АН СССР (а) и Предприятием № 2 ГУГК при СМ СССР (б) в 1971–1984 годах.

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 GPS-приемниках возможности принимать две частоты, позволило точно учитывать задержки распространения сигнала через ионосферу, используя тот же дисперсионный метод, который был применен в прецизионных светодальномерах-рефрактометрах. Основным шагом к повышению точности измерений гражданскими потребителями GPS следует считать создание в 1994 г. специальной службы, работающей в рамках международной ассоциации, призванной обеспечивать всех пользователей прецизионными параметрами орбит спутников. Эта служба получила название IGS (International GNSS Service). В ходе работы IGS выявилось, что высокая (предельно возможная) точность измерений в первую очередь необходима специалистам решающих геодезические задачи. Это задачи по изучению современных движений земной коры, задачи по изучению деформационных предвестников землетрясений, изучение постсейсмических деформаций, движения глобальных литосферных плит и деформаций на границах плит.

Переход на использование GNSS при изучении СДЗК на Камчатке был осуществлен в середине 90-х годов XX в. После этого появилась возможность проводить исследования в региональном и в глобальном масштабах. Сегодняшний этап развития исследований СДЗК с помощью GNSS характерен развитием глобальных и региональных сетей на основе постоянно работающих станций.

Помимо геодезических технологий, для исследования СДЗК с середины 70-х годов XX в. применялись уровенные наклонометры конструкции Ю.С. Доброхотова [Доброхотов, 1972], в 80-х годах был осуществлен переход на скважинные наклонометры модели ТМ-1В (производства США) [Operating Instructions, 1975]. В 90-х годах использовались скважинные деформометр и наклонометр конструкции Исиа. Деформометр представляет собой не извлекаемый трехкомпонентный датчик, который был установлен в скважине глубиной 30 метров. Чувствительность деформометра 5×10^{-8} , наклонометра — 0.1 мкр, что позволяло регистрировать, как приливные волны с амплитудой порядка 0.05 ppm и 1 мкр соответственно, так и деформационные сигналы, связанные с землетрясениями различной магнитуды на разном расстоянии от места установки приборов.

После большого перерыва наклономерные наблюдения были продолжены в 2010 году, после установки на территории Камчатского края восьми наклономеров. Благодаря удачной конструкции безынерционные наклонометры Applied Geomechanics 701-2A, разработанные первоначально для узкой цели мониторинга колебаний высот-

ных зданий, используются для проведения геодезических наблюдений. Установлено две группы наклономерных станций. Первая группа представляет собой 4 станции в районе г. Петропавловска-Камчатского РЕТТ (с/с Петропавловск), МИНТ (Мишенная), IVIS (Институт вулканологии), KRMT (с/с Карымшина). Вторая группа установлена в рамках совместных работ с Университетом Хоккайдо, ИВиС ДВО РАН и КФ ГС РАН в районе вулкана Ключевская сопка: KLYT (с/с Ключи), LGNT (Логинова), APNT (с/с Апахончич), CYRT (с/с Цирк) (рис. 2). Данные со станций РЕТТ, МИНТ, KLYT, IVIS принимаются в оперативном режиме с задержкой в 1 час. Информация с остальных станций передается на внешних носителях с периодичностью от 1 недели до 3 мес.

В дальнейшем станции в районе Ключевской группы вулканов будут оборудованы системами автономного питания и передачи данных, что позволит увеличить оперативность получения и обработки информации. Данные могут быть использованы для понимания деформационных процессов, связанных с тектоническими, вулканическими и техногенными воздействиями. Также представляет интерес совместный анализ волновых форм землетрясений, полученных сейсмографами и наклономерами.

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ GNSS-НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВАХ

До 1997 г. северная часть Евразии была покрыта GPS-станциями крайне неравномерно, что порождало значительные ошибки при моделировании СДЗК на территории Сибири и Дальнего Востока России. С 1997 г. в рамках Геофизической Службы РАН была создана опорная сеть GPS-станций входящая в IGS по всей территории северной Евразии (сеть NEDA), охватывающая континент от Восточно-Европейской платформы через Уральский хребет и всю Сибирь до Чукотки, Камчатки и Сахалина [Быков и др., 2009].

Для решения региональных задач необходимо было создать более плотную региональную сеть GPS станций на Камчатке и Командорских островах с шагом 200–300 км. Работы по созданию сети KAMNET были начаты в 1996 году КФ ГС РАН (тогда КОМСП) совместно с ИВиС ДВО РАН в рамках международного соглашения с Университетом Хоккайдо (Япония) “Исследование сейсмотектоники Охотоморской плиты” и проекта “RUSEG” (Российско-Американский геодезический эксперимент/Russia–US Experiment on Geodynamics) с Колумбийским университетом (США). И к октябрю 1997 г. сеть в составе 8 станций постоянных наблюдений начала свою работу.

Основные задачи, которые приходилось решать при создании региональной сети KAMNET это создание полностью автоматизированной си-

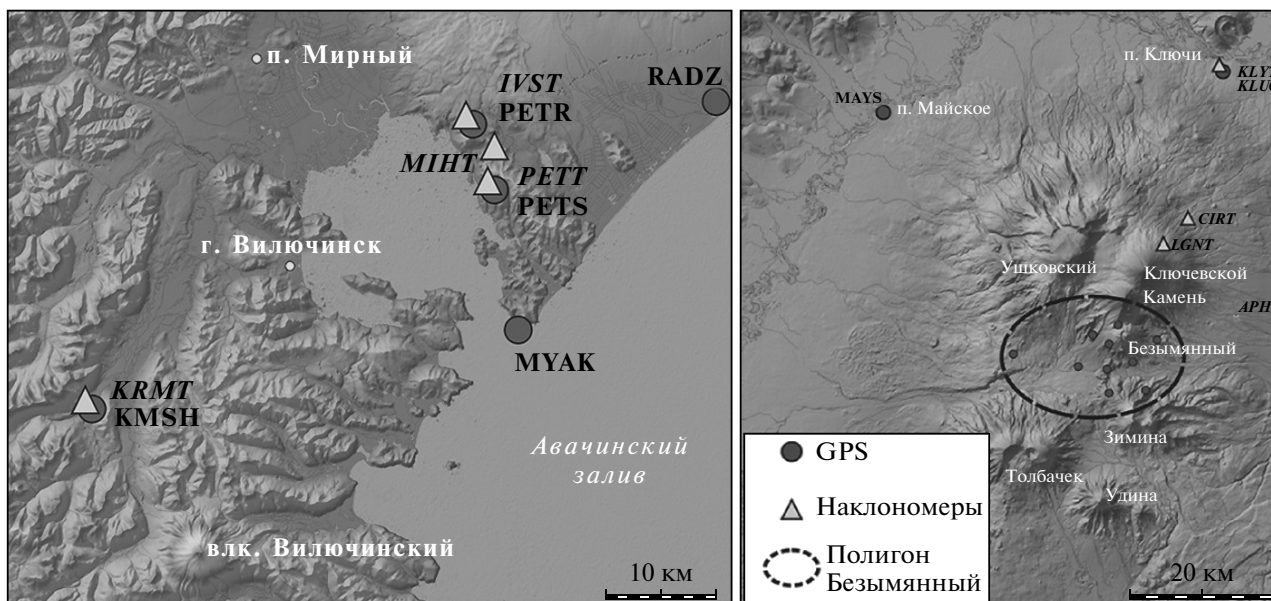


Рис. 2. Схемы расположения постоянных пунктов GPS и наклономерных наблюдений в районах: (а) – г. Петропавловска-Камчатского; (б) – Ключевской группы вулканов.

стемы сбора и предварительной обработки данных на станциях, создание Центра Сбора Данных (ЦСД), освоение и внедрение в рутинный режим программных средств высокоточной обработки и анализа GPS-наблюдений. Для установки GPS-антенн был использован опыт создания устойчивых пилонов для призмных отражателей светодальномеров. Учитывая малую населенность территории Камчатки и практически полное отсутствие инфраструктуры, станции GPS совмещали с метео и сейсмостанциями, обеспечивая, в том числе, и комплексность наблюдений.

На текущий момент (2012 год) сеть состоит из 17 постоянных станций КФ ГС РАН, установленных с шагом примерно в 200 км, и станции сети NEDA ГС РАН – PETS, входящей в глобальную сеть IGS. Постоянные станции сети KAMNET исполняют роль опорной геодезической сети для эпизодических наблюдений в предполагаемых эпицентральных зонах сильных ($M > 7.0$) землетрясений и районах активных вулканов (врезки на рис. 3), в частности на вулканах Карымский и Безымянный. В общей сложности с 1996 г. с различной эпизодичностью были выполнены повторные измерения на более чем сотне пунктах.

Для высокоточных GNSS-измерений используются двухчастотные приемники геодезического класса TOPCON GP-R1DY, ASHTECH Z-XI13, Sokkia Radian, JAVAD Lexon-GGD, Trimble 4000, Trimble NETRS. Необходимым условием работы GPS-станции, входящей в сеть мониторинга за современными движениями земной коры, является жесткая и однозначная фиксация приемной антенны. Геодезический пункт для GPS-наблю-

дений представляет собой железобетонное сооружение, заглубленное ниже глубины промерзания грунта. Высота выноса пилона над поверхностью должна исключать заметание антенны снегом. Пункт оборудуется геодезическим центром и системой принудительного центрирования, однозначно фиксирующей антенну в рабочем положении. Иногда используются геодезические центры в виде винтовых марок, заложенных на крышах монолитных зданий. Такой вариант сокращает время на установку пункта. При этом, под влиянием перемещения элементов конструкции здания увеличиваются шумы и возрастает вероятность потери геодезического центра в результате сильного землетрясения, что и произошло с отдельными пунктами нашей GPS-сети во время Олторского землетрясения в 2006 г. [Левин и др., 2010].

Сеть постоянных станций имеет полностью автоматизированную систему сбора, передачи и архивирования данных. Система была разработана в 2007 году первоначально для организации передачи данных по протоколам TCP/IP. Поддерживает все типы используемых GPS-приемников. На станциях с устаревшим оборудованием TOPCON GP-R1DY (ASHTECH Z-XI13) и Trimble 4000 установлены компьютеры в исполнении “micro-PC” под управлением ОС LINUX. Их задача считывать данные с приемников с преобразованием в формат RINEX, предоставлять удаленный доступ к архиву и обеспечивать удаленное управление станцией. Компьютер ЦСД, работающий также под ОС LINUX, запрашивает по расписанию данные со станций, формирует архив, ведет статистику работы станций. Отладка системы сбо-

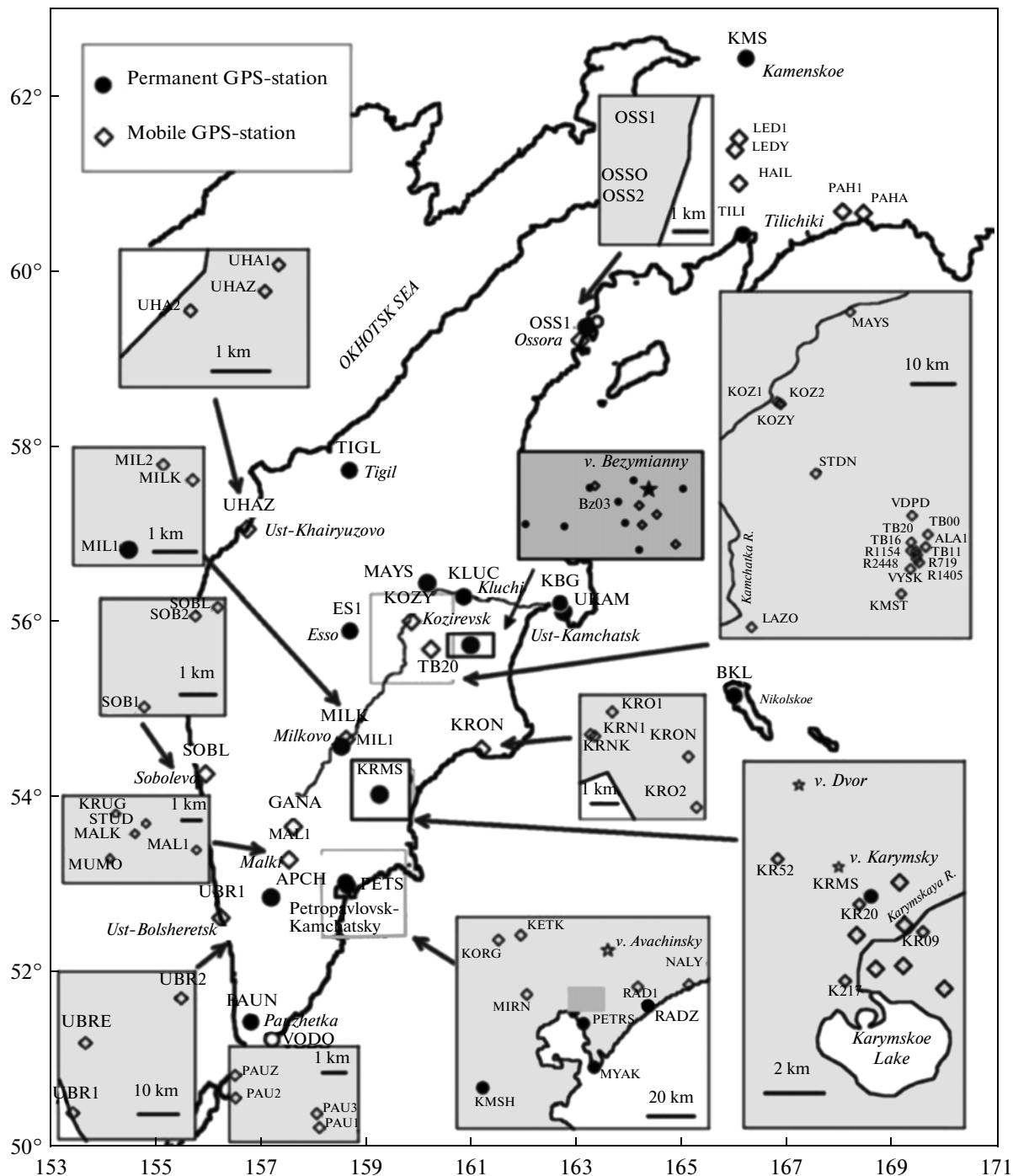


Рис. 3. Схема расположения постоянных станций и пунктов эпизодических наблюдений сети KAMNET.

ра данных позволила начать в 2009 году перевод пунктов сети KAMNET на регистрацию с 1 секундным интервалом. В настоящее время все станции, подсоединенные к системе, или работают в таком режиме (рис. 4а), или могут быть включены при необходимости. Система не имеет технических ограничений для организации передачи данных в режиме реального времени. Единственным сдерживающим фактором является качество связи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА СДЗК НА КАМЧАТКЕ

За 14 лет постоянных GNSS-наблюдений сетью KAMNET зарегистрированы перемещения станций связанные с сильными сейсмическими событиями и проявлениями активного вулканизма. Длительный период наблюдений позволяет получать точные величины скоростей

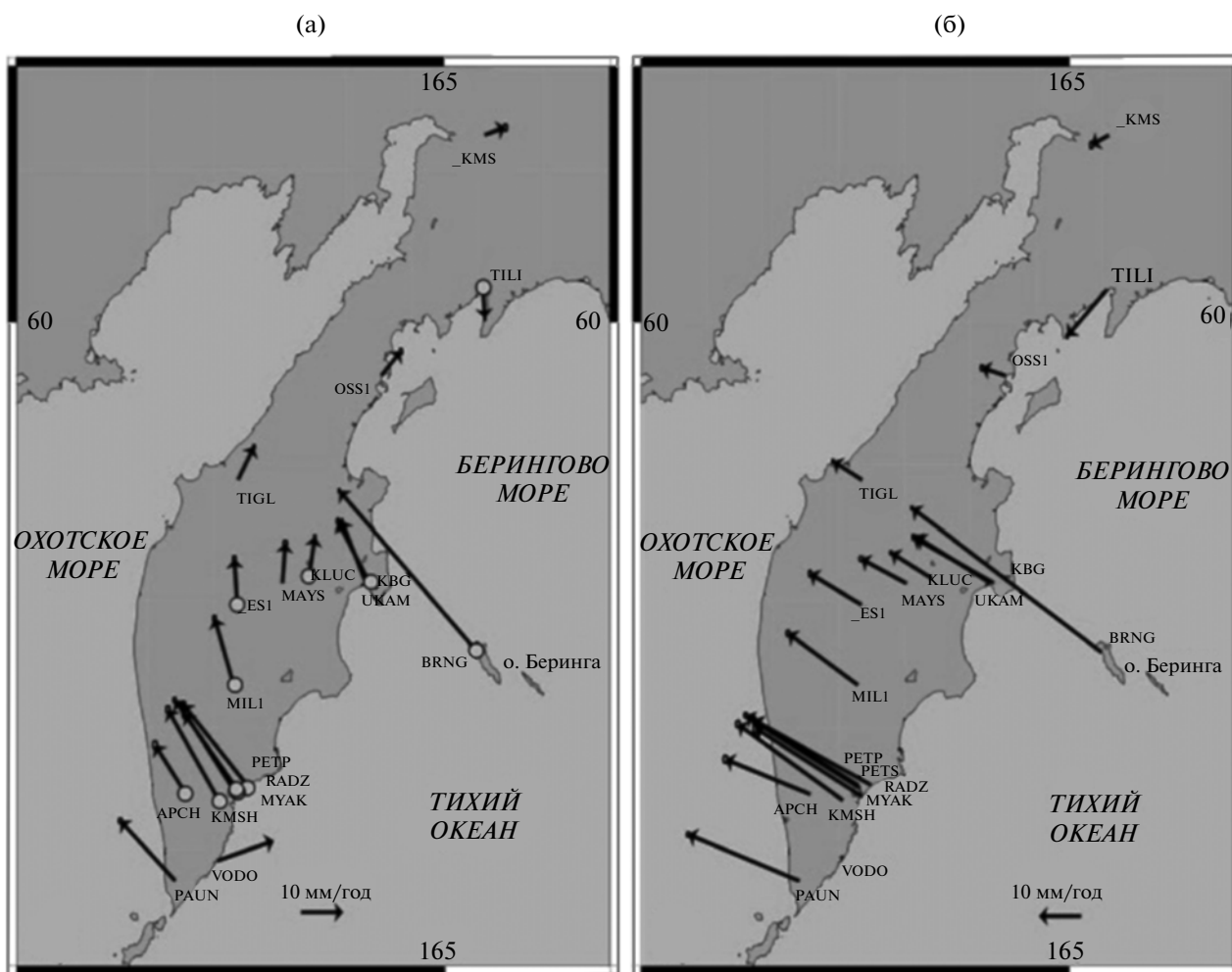


Рис. 4. Скорости перемещений по GPS-измерениям относительно: (а) – Североамериканской плиты; (б) – Евразийской. Кружками отмечены пункты с постоянной односекундной регистрацией.

станций (рис. 4) и определять по ним кинематические и деформационные параметры перемещения и взаимодействия блоков земной поверхности.

СДЗК, связанные с перемещением литосферных плит

Территория, охватываемая сетью, располагается в области конвергентного сочленения трех крупнейших плит: двух “медленных”, преимущественно континентальных, Евразийской и Северо-Американской, и одной “быстрой”, Тихоокеанской. В окрестности их тройного сочленения обособились две плиты среднего размера: Охотия и Берингия, а также ряд более мелких блоков. Большинство из них перемещается с низкими относительными скоростями, сохраняя общие кинематические черты движения крупных материнских плит [Стеблов, 2004].

В южной части полуострова Камчатка, особенно в его восточной части, наблюдаются медленные устойчивые во времени деформации, объясняемые сцеплением Охотской плиты и быстро субдуктирующей под нее Тихоокеанской. Здесь преобладают деформации горизонтального сжатия, главные оси которых почти совпадают с направлением относительного движения Тихоокеанской плиты. Деформации приводят к возникновению соответствующих тектонических напряжений, которые частично сбрасываются при сильных землетрясениях, сопровождаемых быстрым перемещением прилегающих прибрежных районов в обратном направлении (в сторону океана). При Кроноцком землетрясении $M_w = 7.8$ (5 декабря 1997 г.) наблюдались быстрые перемещения станции в радиусе 200 километров по направлению к эпицентру землетрясения, находившемуся восточнее Кроноцкого полуострова [Gordeev et al., 2001; Титков и др., 2010].

Для интерпретации перемещений пунктов GPS-наблюдений в южной части Камчатского полуострова была разработана математическая модель “жесткое вращение с однородной деформацией” [Титков, 2009]. Модель описывает горизонтальные движения как сумму жесткого вращения тела на поверхности сферы и однородную деформацию в касательной плоскости с полюсом в центре группы точек. Параметры модели оцениваются методом наименьших квадратов. С помощью разработанной математической модели проведен кинематический и деформационный анализ части Камчатского полуострова, находящейся на Охотской плите (рис. 5). Движение Охотоморской части Камчатки задается, в основном, взаимодействием с Тихоокеанской плитой. Компонента вращения, описывающая движение жесткого тела направлена четко по направлению движения Тихоокеанской плиты (рис. 5а). Происходит сжатие восточного побережья под воздействием субдукции Тихоокеанской плиты под Охотскую. Относительная деформация сжатия 5×10^{-8} в год (рис. 5б). Ось сжатия имеет наклон по часовой стрелке к направлению движения Тихоокеанской плиты. Наличие наклона, возможно, объясняется не совсем точным определением взаимного движения Охотоморской и Тихоокеанской плит в зоне субдукции. Движение Тихоокеанской плиты определяется по далеким от Камчатки станциям. Поэтому неизбежные изменения кинематических характеристик движения при деформировании ее в зоне субдукции невозможно определить геодезическими методами.

Северная часть Камчатки, включая Южную Корякию, располагается в широкой активной области сочленения Северо-Американской, Охотской и Берингийской плит. Район Северо-Восточной Азии и Берингова моря остается пока одним из крупнейших регионов, по которому нет определенности в конфигурации тектонических плит. Инструментальных исследований в данном регионе чрезвычайно мало, что связано с его обширностью, малонаселенностью и отсутствием необходимой для проведения измерений инфраструктуры. Олюторское землетрясение, произошедшее 20 апреля 2006 г., $M_w = 7.6$ в Корякском нагорье, дало толчок к проведению геодезических измерений в северной части Камчатского края с целью инструментального определения положения границы Берингийской плиты, гипотеза о существовании которой на сегодняшний день доказывается только проявлением местной сейсмичности [Левин и др., 2007; 2010].

После Олюторского землетрясения выполнены наблюдения на трех дополнительных пунктах, расположенных по разные стороны предполагаемой границы блоков. Отсутствие финансирования не позволило выполнить повторные измерения. Поэтому пока в данном регионе можно сделать только грубую, качественную оценку параметров

взаимного перемещения плит. По направленности векторов скоростей GPS-пунктов, можно предположить, что пункт Оссора и Каменское принадлежат Северо-Американской плите, а Тиличики – Берингийской. Перемещения GPS-пунктов KMS, OSSO, TIL показывают на правосторонний сдвиг между Берингийской и Северо-Американской плитами со скоростью около 15 мм/год.

К числу мелких блоков относится Командорская микроплита. При использовании данных наблюдений Камчатской GPS-сети и модели движения крупных плит (Евразийской, Северо-Американской, Тихоокеанской, построенных по GPS-измерениям станций IGS) было определено, что Тихоокеанская плита в районе Командорского блока движется относительно Евразии примерно на северо-запад со скоростью 79 мм/год (рис. 6). Скорость Командорской микроплиты относительно Евразии, составляет 55 мм/год. Направления Тихоокеанского и Командорского векторов практически совпадают. Командорский блок “отстает” от Тихоокеанской плиты со скоростью 24 мм/год. Сравнение двух последних величин показывает, что Тихоокеанская плита оказывает большее влияние на движение Командорской, чем расположенная севернее Берингия.

Таким образом, как сейсмологические данные [Ладер и др., 2009], так и GPS-измерения [Левин и др., 2002] подтверждают для Командорской микроплиты модель “щепки”, движущейся на северо-запад вдоль трансформной границы под преимущественным влиянием Тихоокеанской плиты и упирающейся во фронтальном торцовом сочленении в полуостров Камчатского мыса.

СДЗК на Камчатке, связанные с сейсмическими событиями

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, 3).

На рис. 7 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 и с землетрясением (3) 28.12.1984 (рис. 8).

Относительные изменения отметок реперов до 80 мм совпадают по знаку с механизмом землетрясения: взброс для землетрясения 15.12.1971 [Гусев и др., 1975] и сдвиг с небольшой взбро-

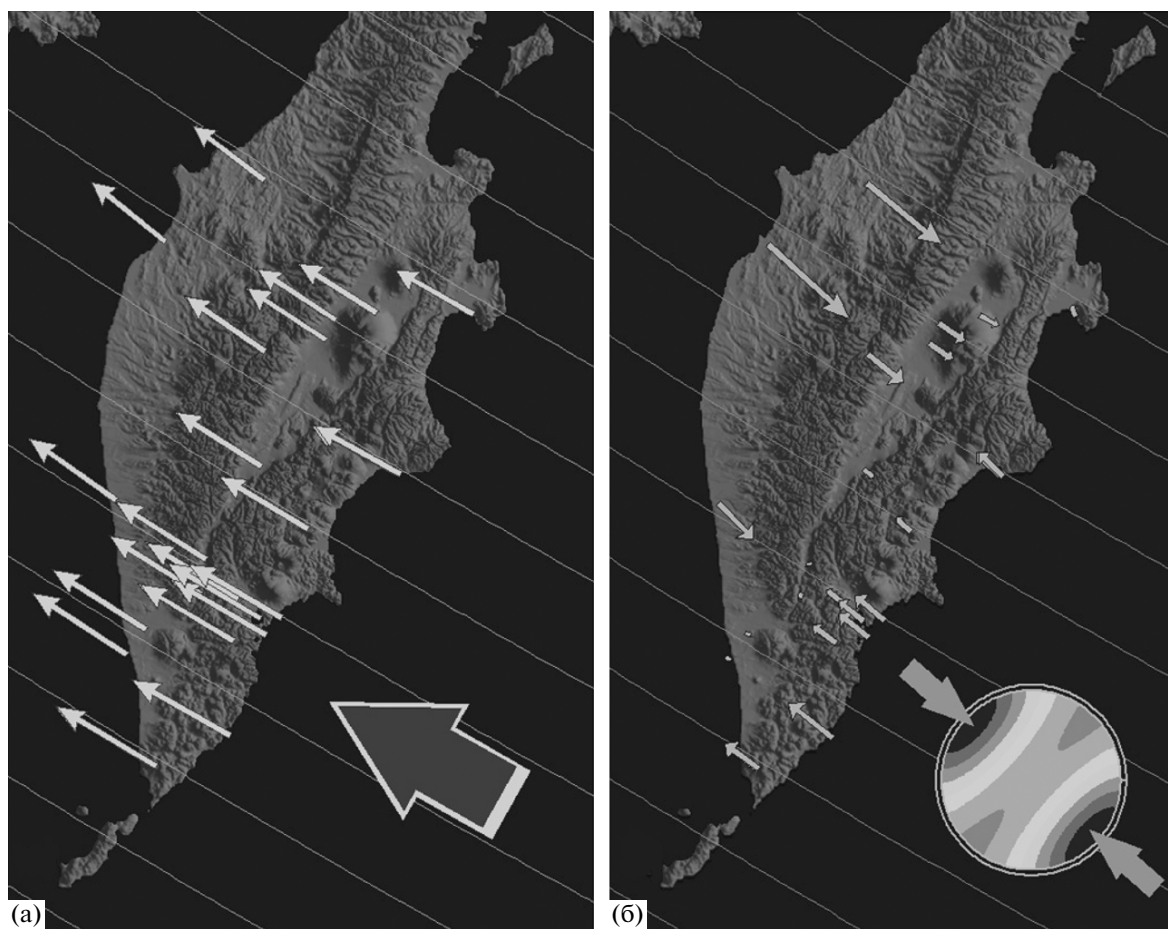


Рис. 5. Компоненты модели “жесткое вращение с однородной деформацией”: (а) – компонента “жесткое вращение”; вектора показаны относительно системы координат “Евразия–Северная Америка”; полюс вращения плит общий, угловые скорости равны и противоположны по знаку; тонкие стрелки – векторы вращения, большая стрелка – вектор скорости Тихоокеанской плиты, параллельные линии – направление движения Тихоокеанской плиты; (б) – компонента “однородная деформация”, стрелки – векторы деформации. В правом нижнем углу – тензор однородной деформации с направлением главных осей сжатия.

совой компонентой для землетрясения 28.12.1984.

По результатам светодальномерного мониторинга в районе Авачинского залива из обсерватории “Мишенная” был выявлен тренд (деформации сжатия), а также зарегистрированы упругие бухтообразные вариации деформаций района Авачинского залива (рис. 9), которые мы связываем с землетрясениями (2) 17.10.1983, $M_w = 7.0$ (Δ км), (5) 02.03.1992, $M_w = 6.8$ ($\Delta = 100$ км) и (11) 05.12.1997, $M_w = 7.8$ ($\Delta = 350$ км) (где Δ – 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 субдукции. Естественно, как видно из графика, произошедшие

сильные землетрясения не снимают накопившиеся напряжения в районе Авачинского залива, но наиболее сильные сбросы напряжений до 2×10^{-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) 17.08.1983 с $M_w = 7.0$ был дан удачный прогноз [Gusev, 1997], благодаря чему нам впервые удалось зарегистрировать как горизонтальные, так и вертикальные смещения в эпицентральной зоне (рис. 10) до, во время и после сейсмического события. Светодальномерные измерения в эпицентральной зоне землетрясения 17.08.1983 с $M_w = 7.0$, были организованы как вдоль, так и в крест предполагаемого геологического разлома. Величина амплитуды косейсмического скачка деформации от 2 до 4 ррт на взаимно-перпендикулярных линиях (линия 1–3 и

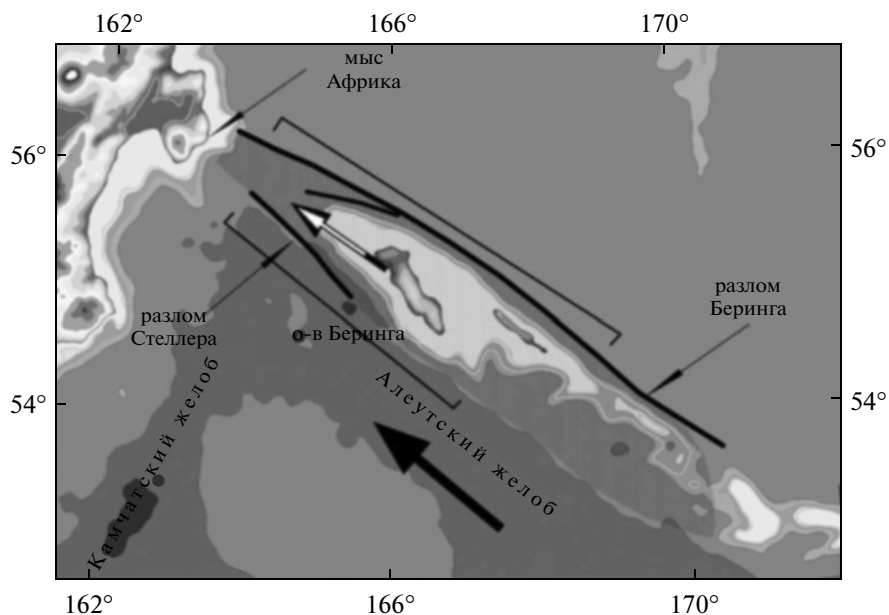


Рис. 6. Относительное движение Командорской микроплиты: черная стрелка – вектор скорости Тихоокеанской плиты относительно Евразийской (79 мм/год), модель GRSM 1.2; черно-белая стрелка – вектор скорости GPS-станции BRNG относительно Евразии (55 мм/год).

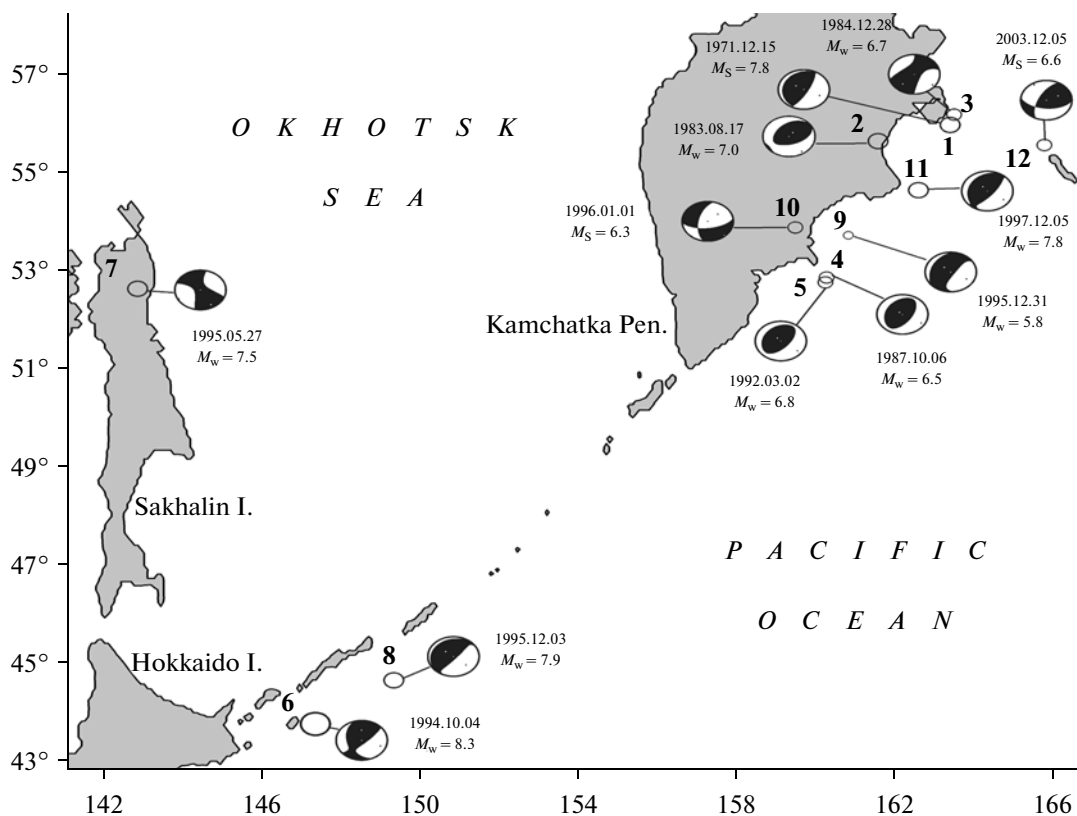


Рис. 7. Землетрясения, от которых были зарегистрированы как вертикальные, так и горизонтальные компоненты СДЗК.

линия 1–2), а также близкие по величине: 16.9 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 ($\Delta = 7$ км) землетрясении.

Измеренные инструментально компоненты СДЗК от данного сейсмического события были: до основного толчка скорость вертикальной компонен-

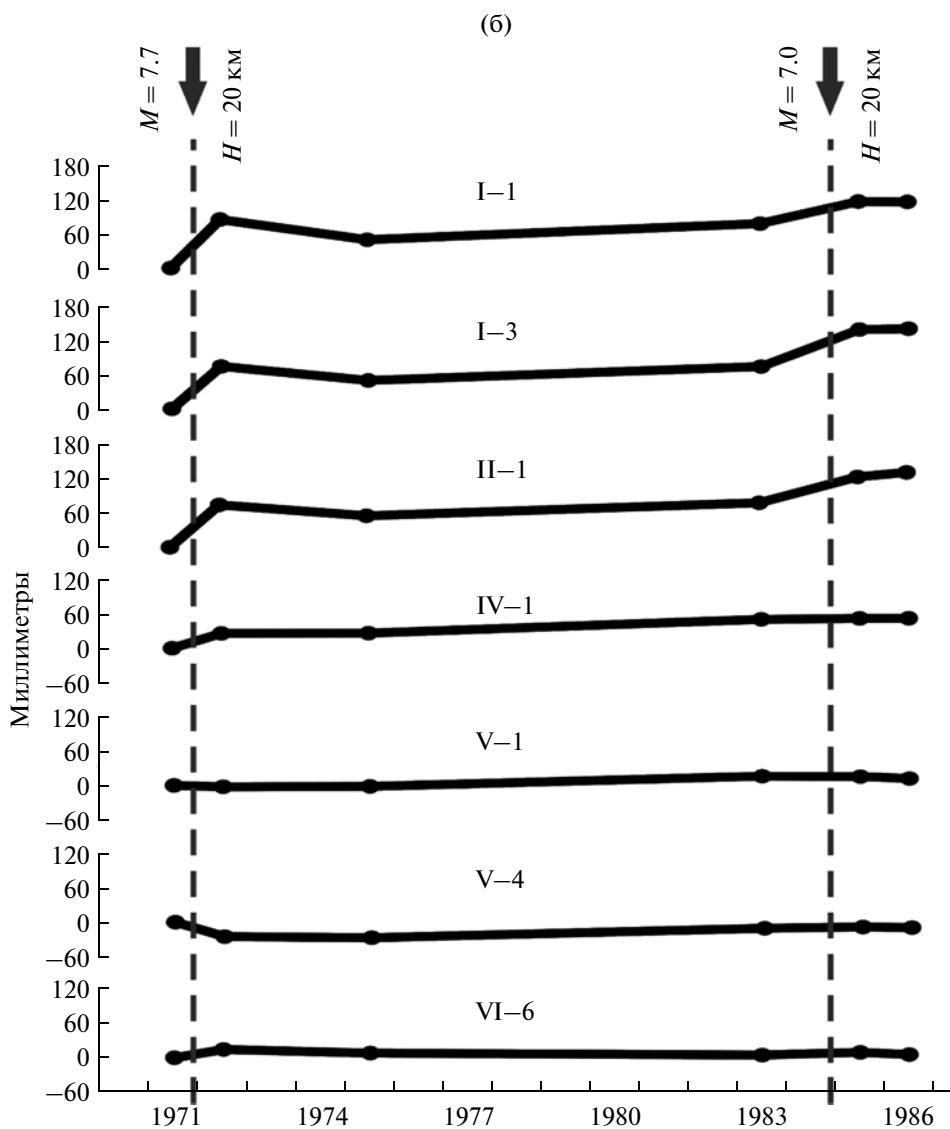
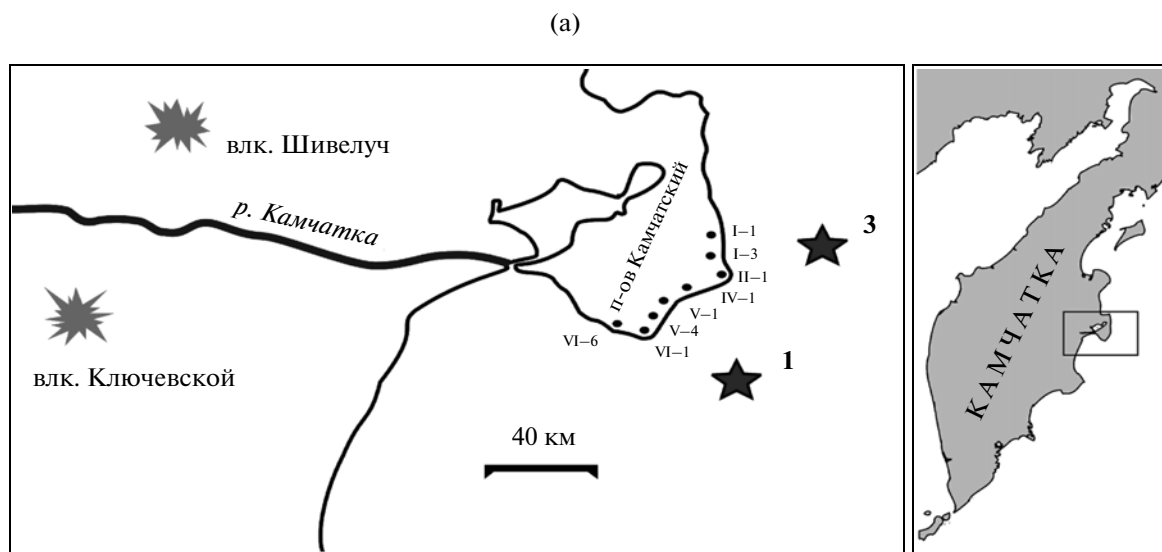


Рис. 8. Вертикальные деформации в связи с сильными землетрясениями: (а) – схема расположения реперов и эпицентров землетрясений; (б) – смещения реперов относительно их положения летом 1971 г.

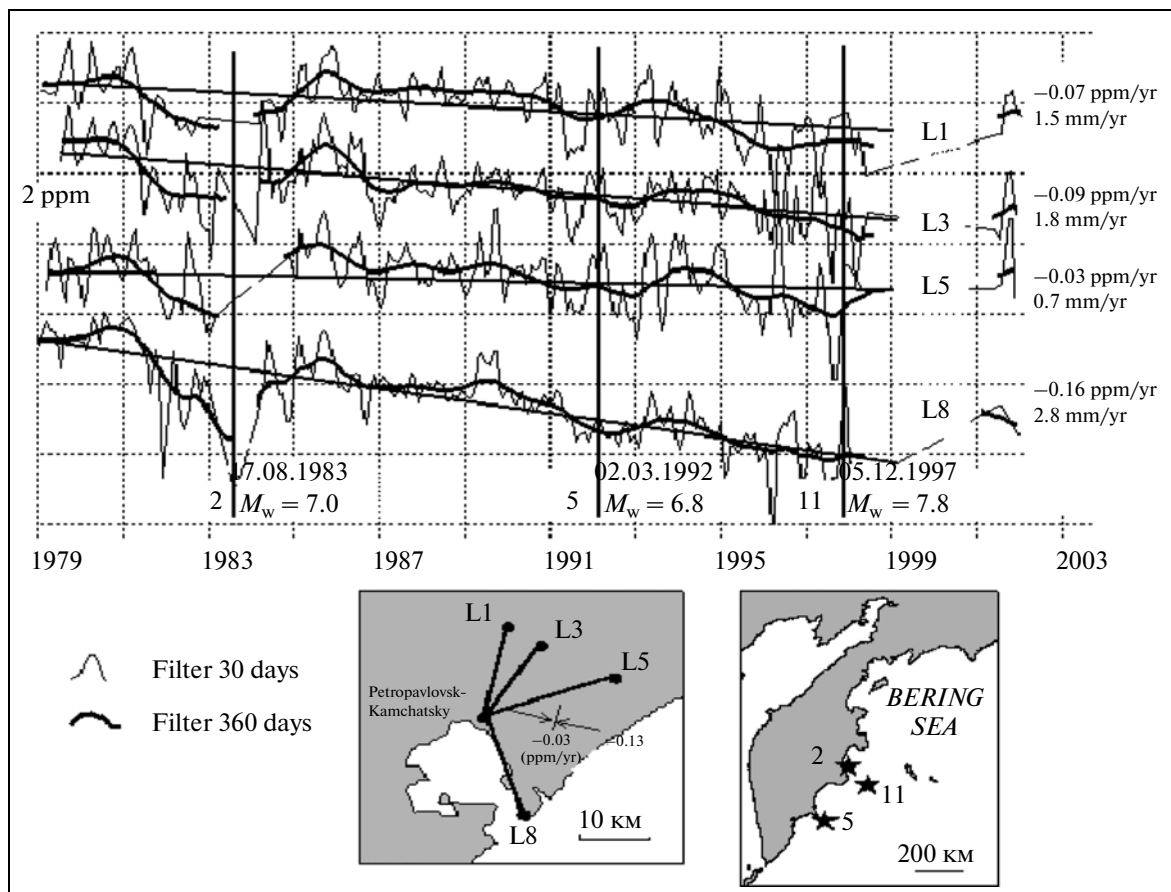


Рис. 9. Результаты линейных измерений из обсерватории “Мишенная”.

ты 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. 11). Наблюдается упругий характер деформационных процессов, и чем больше энергия землетрясения, тем больше амплитуда горизонтальных деформаций. Это была первая в нашей практике надежно зарегистрированная аномалия горизонтальных деформаций, которую мы могли определить как краткосрочный геодезический предвестник землетрясения.

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 $1-2 \times 10^{-7}$. При проведении очередной серии наблюдений из обсерватории “Мишенной” нами была зарегистрирована деформационная волна. Ближайшее по времени к

данному явлению было Олюторское землетрясение 08.03.1991, $M = 7.0$, 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/ч.

Мониторинг скважинным деформометром и наклономером конструкции Исиа позволил регистрировать как приливные волны (рис. 12), так и деформационные сигналы, связанные с землетрясениями различной магнитуды и на разном расстоянии от места установки нашего прибора. Это Шикотанское землетрясение (6) 04.10.1994, $M_w = 8.3$ ($\Delta = 1325$ км) (рис. 13), Нефтегорское землетрясение (7) 27.05.1995, $M_w = 7.5$ ($\Delta = 1063$ км) (рис. 14), Курильское землетрясение (8) 03.12.1995, $M_w = 7.9$ ($\Delta = 1154$ км) (рис. 15), землетрясение (9) 31.12.1995, $M_w = 5.8$ ($\Delta = 161$ км) и Карымское землетрясение (10) 01.01.1996, $M_w = 6.3$ ($\Delta = 108$ км) (рис. 16).

Из данных наблюдений скважинным деформометром видно, что, как правило, направление

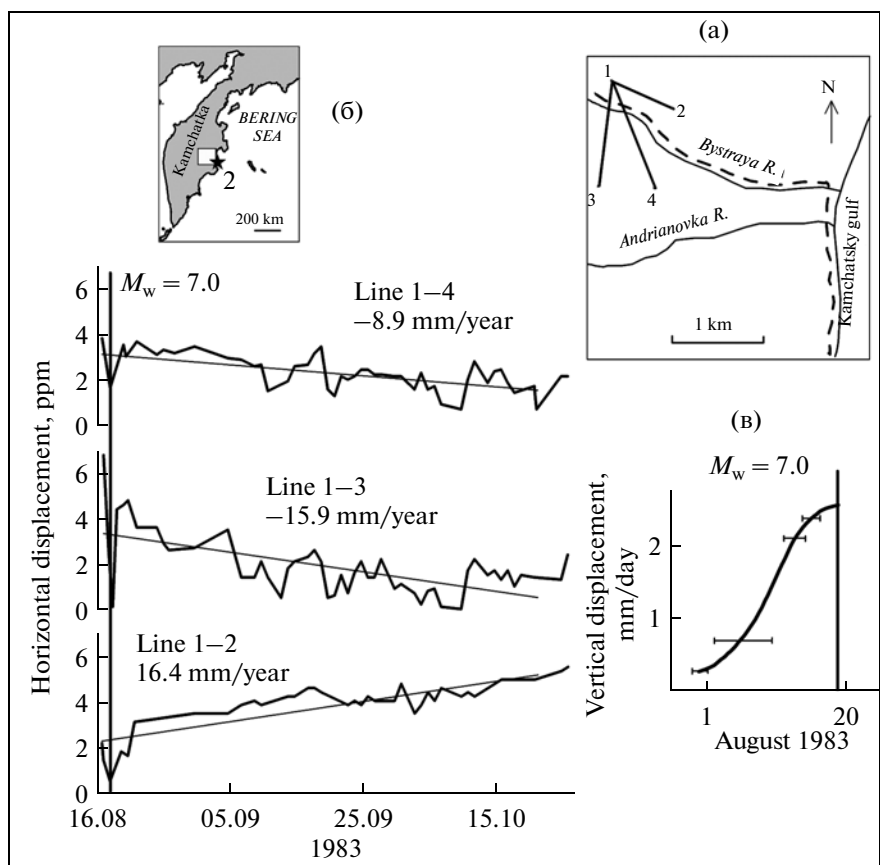


Рис. 10. Горизонтальные и вертикальные смещения в эпицентральной зоне землетрясения 17.08.1983 с $M_w = 7.0$. (а) — полигон “Быстрая”. Цифрами отмечены пункты линейных измерений. Пунктирная линия — нивелирный ход; (б) — график горизонтальных смещений; (в) — график вертикальных смещений.

тензора деформаций совпадает с нодальной плоскостью фокального механизма землетрясений. Практически все зарегистрированные деформации упругие, кроме одного, связанного с землетрясением (9) (рис. 16), 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, связанных с сейсмическими событиями, начался после создания Камчатской сети постоянных GNSS наблюдений KAMNET. С помощью KAMNET были зарегистрированы косейсмические смещения пунктов от трех сильных землетрясений. Это Кроноцкое землетрясение 05.12.1997, $M_w = 7.8$ [Левина и др., 1997; Burgmann et al., 1997] (рис. 17), землетрясение у острова Беринга 05.12.2003, $M_w = 6.6$ [Левин и др., 2006] (рис. 18), и Олюторское землетрясение 20.04.2006 г., $M_w = 7.6$ [Левин и др., 2007; 2010; Пинегина, 2007] (рис. 19). Измеренные косейсмические деформации, связанные с данными землетрясениями, находятся в хорошем согласии

с теми значениями, которые получены при вычислении деформаций по дислокационной модели, использующей Гарвардское решение для тензора сейсмического момента [Burgmann et al., 2001; Gordeev et al., 2001].

Высокочастотная односекундная регистрация позволяет получать записи движений и деформаций земной коры с высоким временным разрешением. Обработка таких наблюдений в кинематическом режиме (без осреднений) позволяет регистрировать поверхностные волны от сейсмических событий.

Детальные исследования СДЗК на активных вулканах

Классическим примером изучения СДЗК на вулкане были работы на БТТИ 1975–1976 годов [Большое..., 1984]. Результаты наблюдений за СДЗК при всех фазах вулканического процесса позволили впервые сделать оценку величины избыточного давления (P), которая при всей грандиозности самого процесса извержения оказалась весьма скромной и составляла 100 кг/см^2 [Федо-

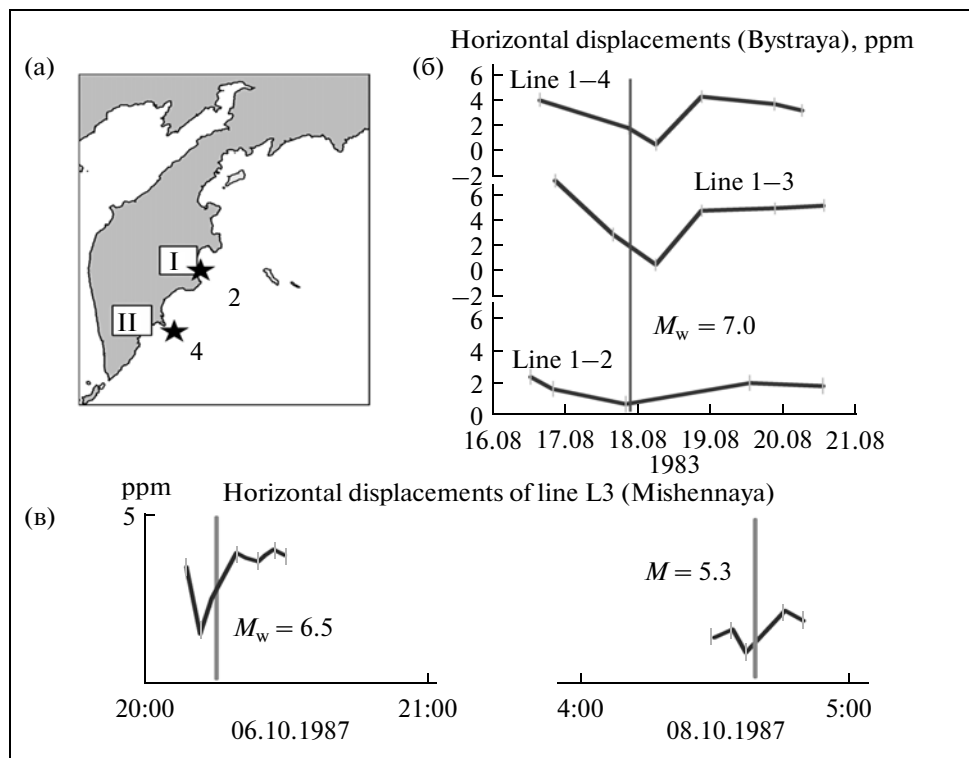


Рис. 11. Горизонтальные смещения, связанные с сильными землетрясениями на полигонах “Быстрая” (I) и “Мишенная” (II): (а) – положение полигонов на полуострове Камчатка; (б) – смещения на полигоне “Быстрая” (схема линий на рис. 6); (в) – смещения на полигоне “Мишенная” (схема линий на рис. 9).

тов и др., 1978]. Построенная модель по данным горизонтальных подвижек достаточно хорошо определила 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.

При изучении СДЗК с использованием светодальномеров во время извержения Авачинского вулкана, происшедшего 13 января 1991 года, были получены такие результаты: горизонтальных деформаций вдоль линий, превышающих ошибку наблюдений, до начала извержения зарегистрировано не было; последующие наблюдения по вееру светодальномерных линий в период самого извержения зарегистрировали деформации до 3×10^{-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 г., проводятся все виды геодезических работ [Магуськин и др., 1980]. После неординарных событий в Карым-

ском вулканическом центре, а именно терминального извержения Карымского вулкана, сильного корового землетрясения с $M_w = 6.3$ и извержения в Карымском озере, ежегодно проводились геодезические наблюдения плотной сетью GPS станций, дополняющие светодальномерные измерения и нивелирование [Магуськин, Левин, 2006; Магуськин и др., 2009]. Работы выполнялись сотруд-

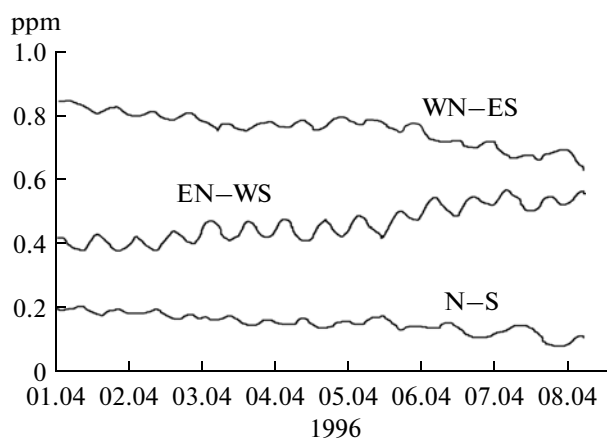


Рис. 12. Приливные деформации зарегистрированные скважинным деформографом.

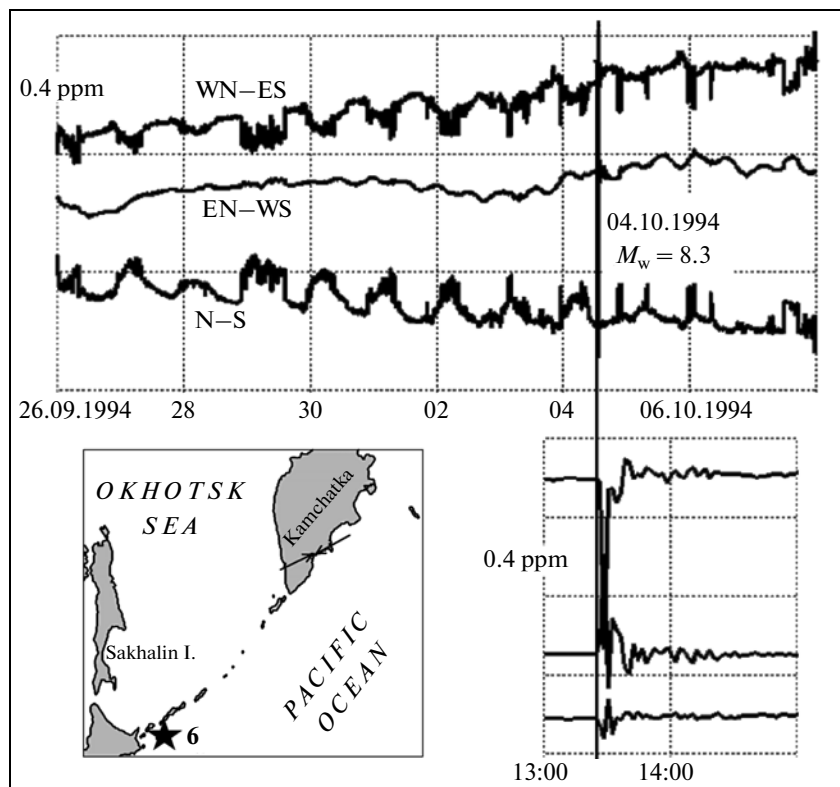


Рис. 13. Горизонтальные пресеизмические и косейсмические деформации, зарегистрированные скважинным деформографом, от Шикотанского землетрясения.

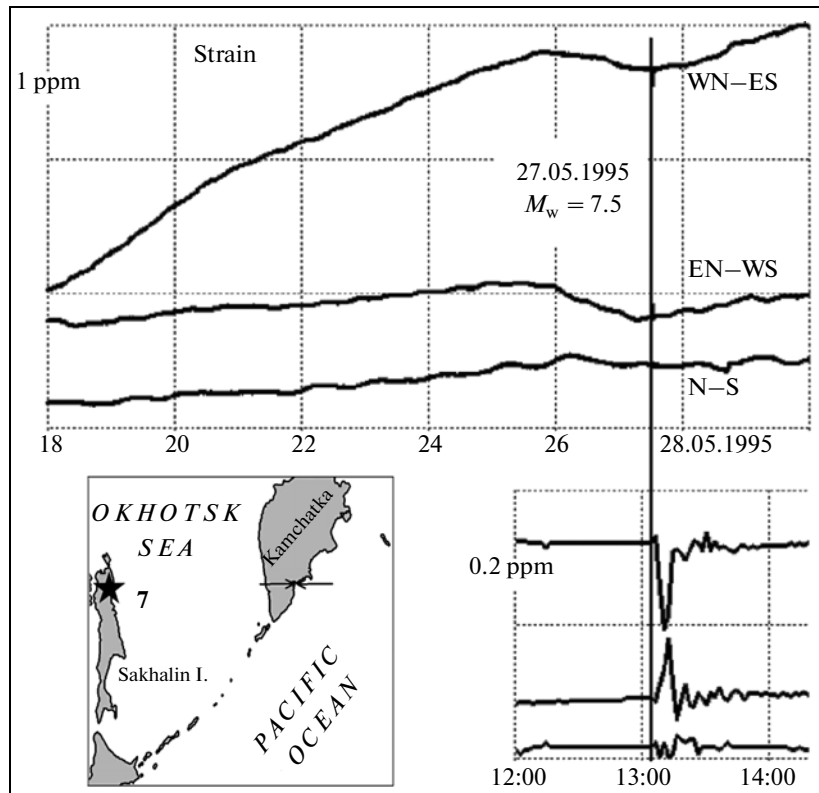


Рис. 14. Горизонтальные пресеизмические и косейсмические деформации, зарегистрированные скважинным деформографом, от Нефтегорского землетрясения.

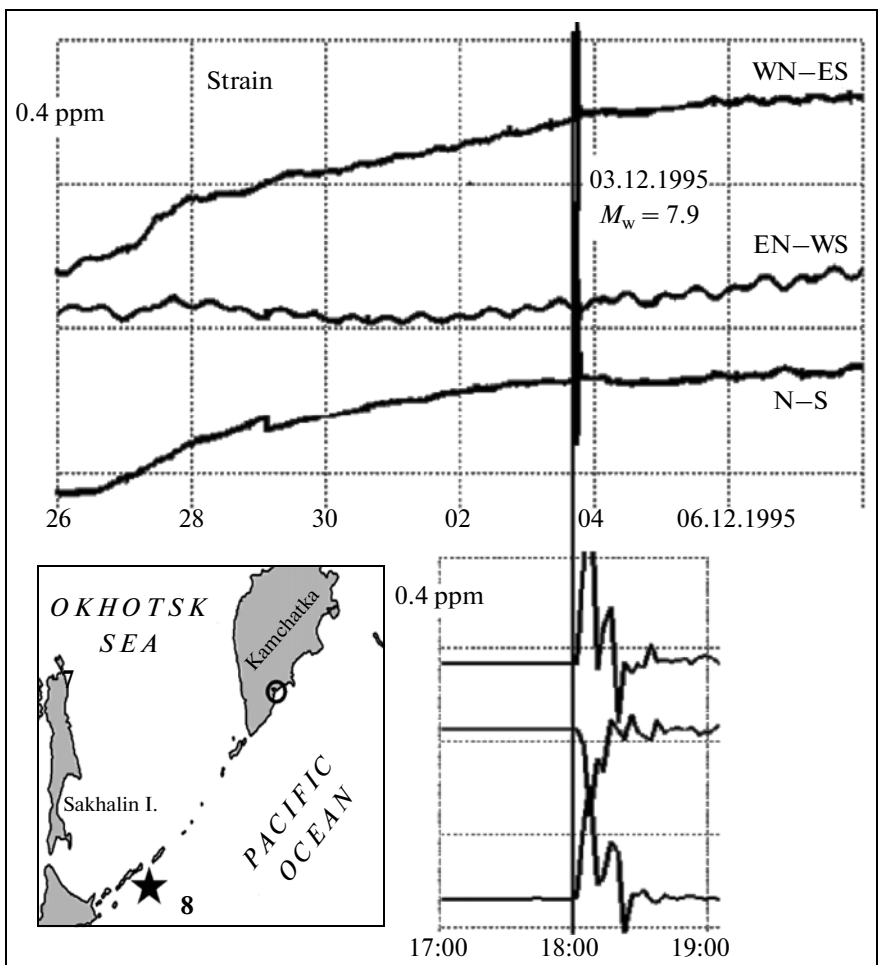


Рис. 15. Горизонтальные косейсмические деформации, зарегистрированные скважинным деформографом, от Курильского землетрясения.

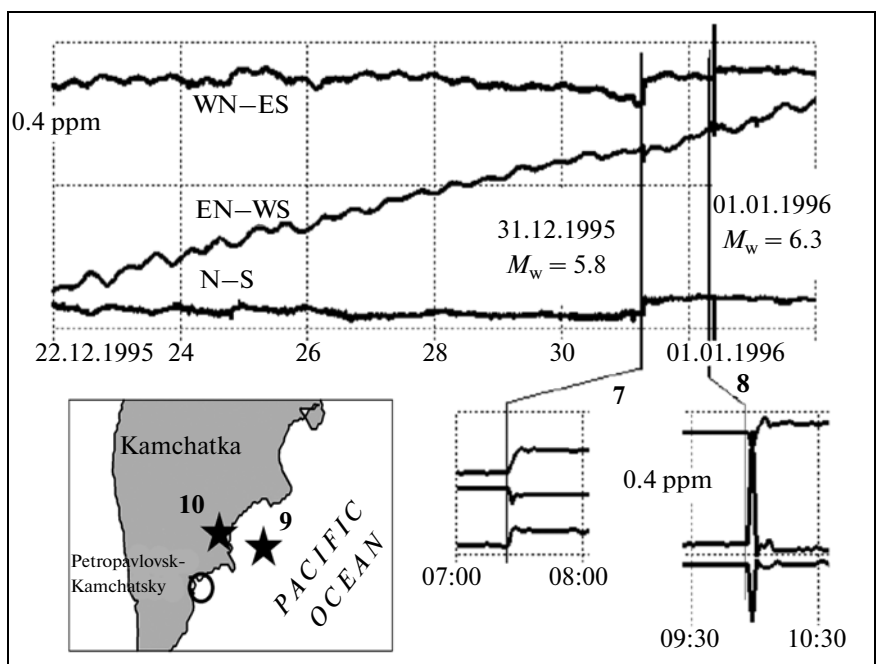


Рис. 16. Горизонтальные деформации, зарегистрированные скважинным деформографом, от землетрясения 9 (31.12.1995, $M = 5.8$) и 10 (01.01.1996, $M = 6.3$).

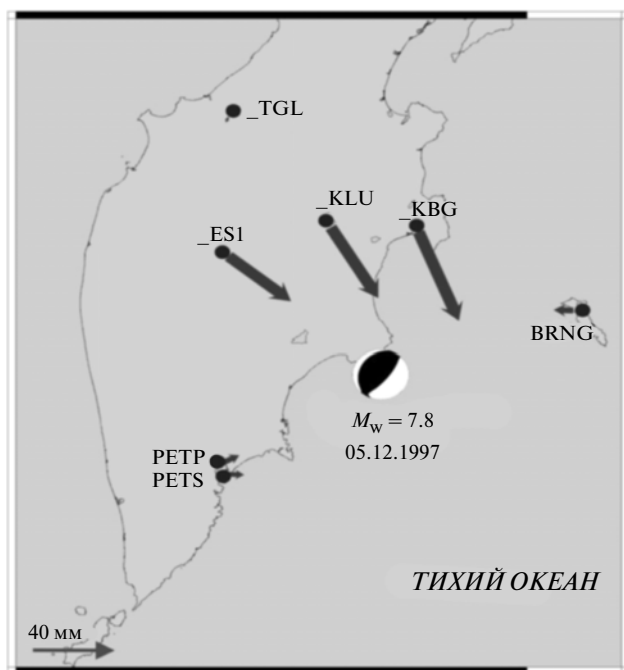


Рис. 17. Косейсмические смещения станций сети KAMNET при Кроноцком землетрясении $M_w = 7.8$, 05.12.1997.

никами ИВиС и КФ ГС РАН на основе договора о научно-техническом сотрудничестве. По результатам геодезических измерений была предложена деформационная модель событий, произошедших в Карымском вулканическом центре 01.01.1996, давшая хорошее согласие с горизонтальными смещениями геодезических пунктов [Левин и др., 2006; 2010].

В 2006–2007 гг. в окрестностях вулкана Безымянный в рамках проекта PIRE (US-Russian Partnership in Volcanological Research and Education) совместными усилиями ИВиС ДВО РАН и КФ ГС РАН был создан локальный геодинимический полигон из 10 пунктов GNSS-наблюдений. Измерения на полигоне используются для изучения взаимосвязи глубинных процессов с динамическим изменением деформаций земной поверхности и построения модели вулканического процесса. Пункты представляют собой бетонные туры (пилоны) с системой принудительного центрирования с постоянной высотой смещения над маркой. Восемь станций работали в автономном непрерывном режиме наблюдений. В 2011 г. постоянные наблюдения на четырех пунктах прекращены. Оставшиеся переведены на автономное питание на солнечных панелях. Схема расположения пунктов в районе вулкана Безымянного показана на рис. 21.

На рис. 22 приведены данные наблюдений на ближайшем к кратеру пункте VZ09 за период с июня 2006 г. по май 2007 г. 24 декабря 2006 г. произошло сильное эксплозивное извержение вулка-

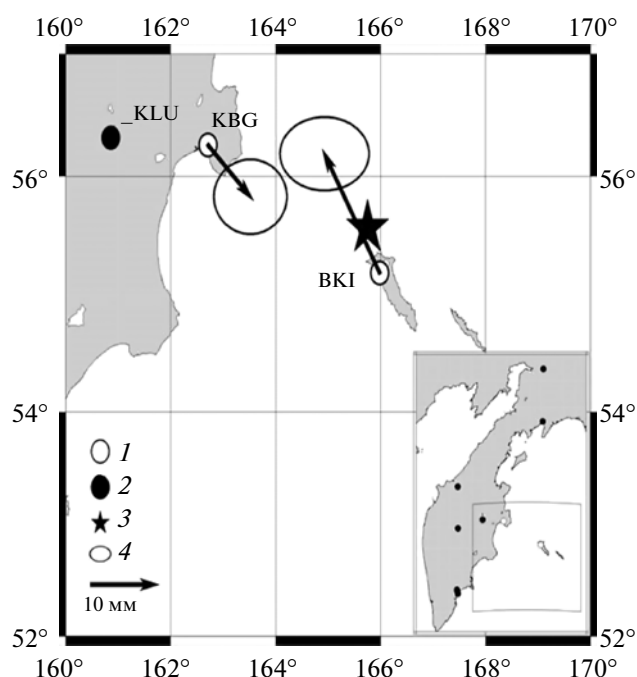


Рис. 18. Косейсмические смещения станций сети от землетрясения у о. Беринга: 1, 2 – пункты наблюдений; 3 – эпицентр землетрясения; 4 – вектора смещений с эллипсом ошибок.

на с отложением пирокластических потоков. Этот момент отразился на графике хода подвижек пункта VZ09, особенно по направлению север–юг.

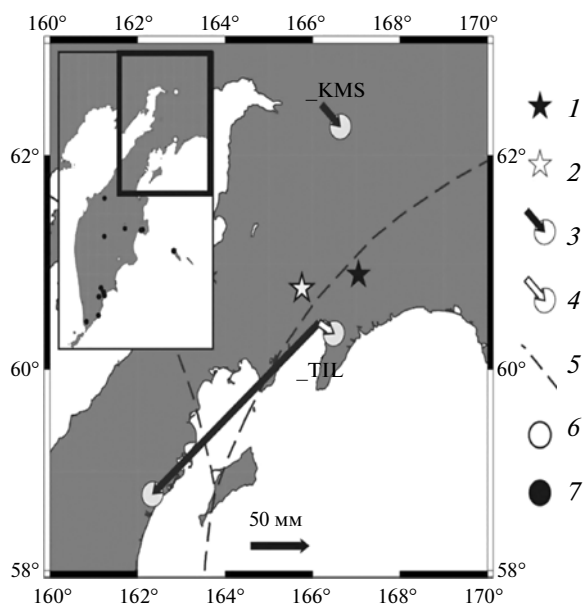


Рис. 19. Косейсмические смещения станций сети от Олюторского землетрясения: 1 – эпицентр землетрясения; 2 – эпицентр крупнейшего афтершока; 3 – вектора смещений от основного события с эллипсом ошибок; 4 – вектора смещений от афтершока с эллипсом ошибок; 5 – предполагаемые границы плит; 6, 7 – пункты наблюдений.

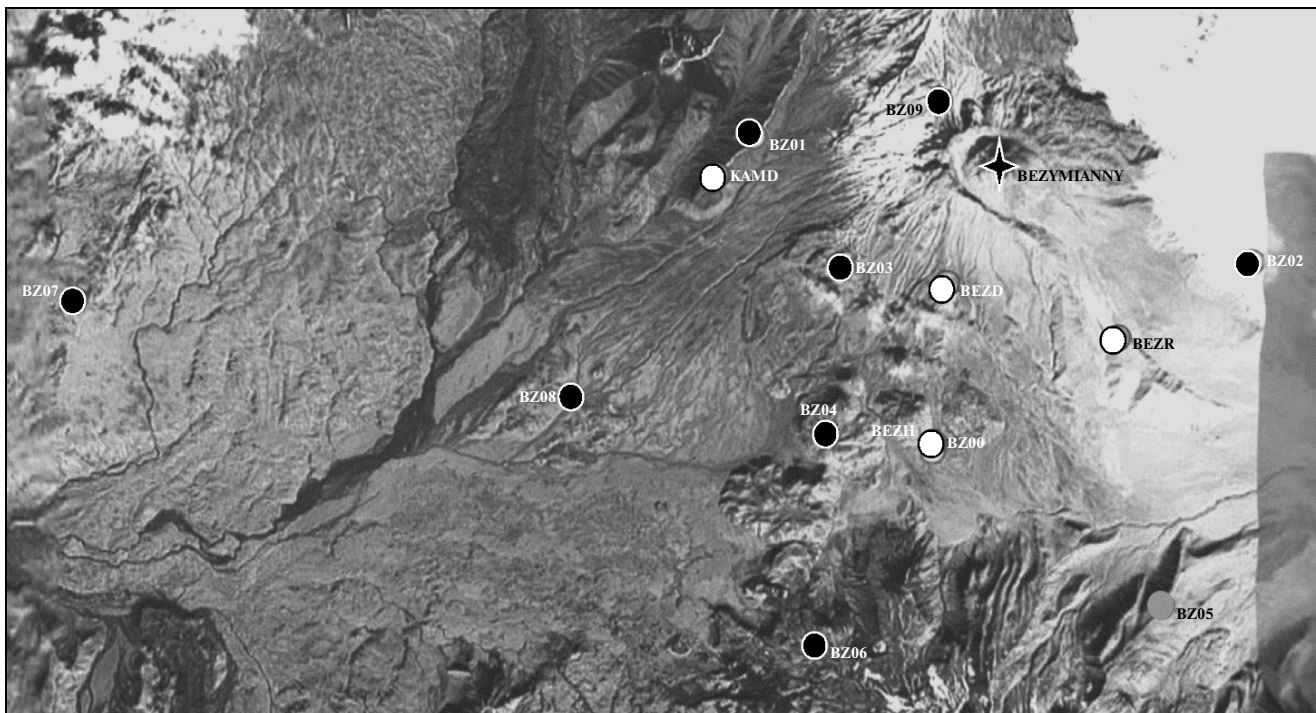


Рис. 20. Локальная сеть GPS-наблюдений в пределах вулкана Безымянный.

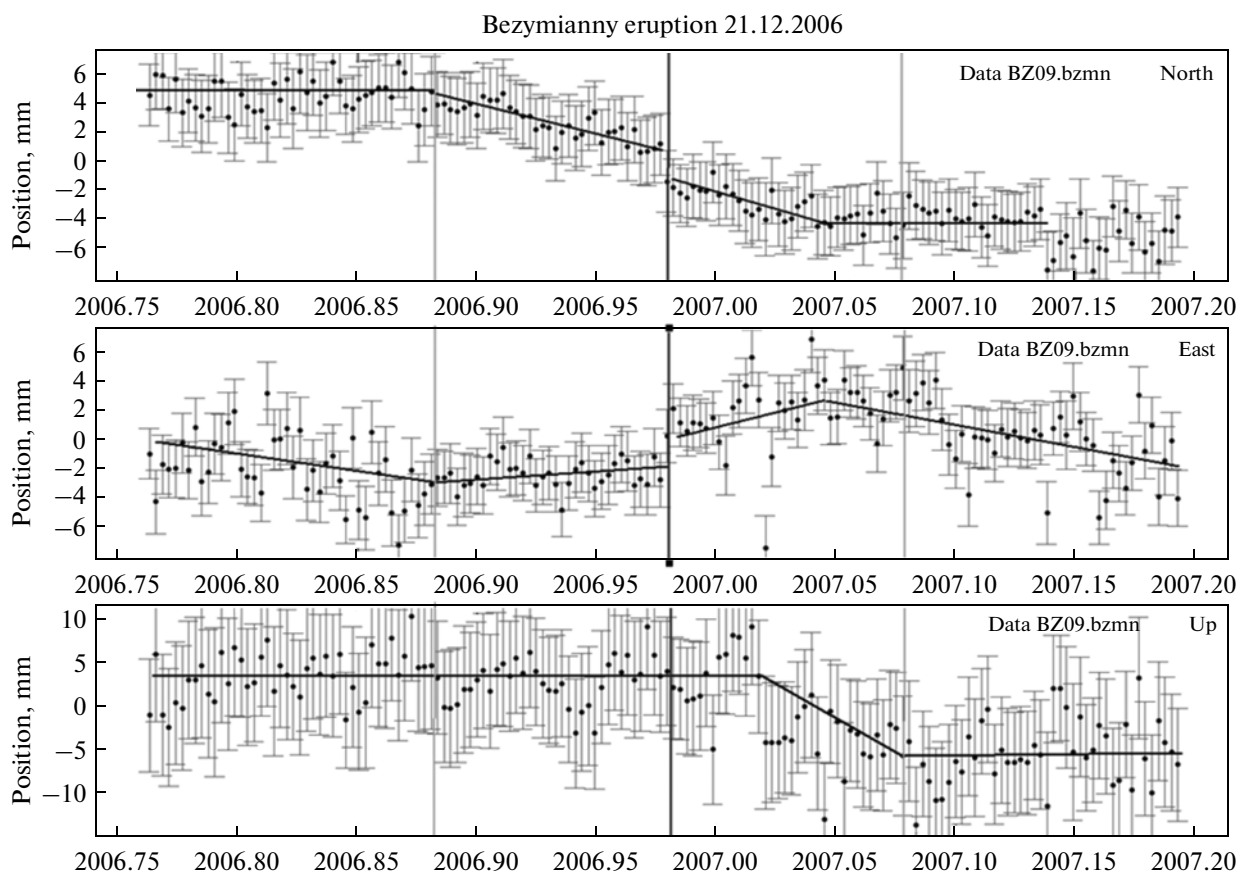


Рис. 21. Временная серия GPS-станции BZ09 в период извержения 21.12.2006. Верхний график – направление север–юг, средний график – направление восток–запад, нижний график – изменение высоты. Черная линия – момент извержения, серыми линиями отмечен период изменения скоростей.

Наиболее интересен ход смещения пункта до и после извержения 24 декабря 2006 г. За 15 дней до извержения направление скорости движения пункта резко изменилось. Во время извержения произошел резкий скачок, далее в течение 25 дней сохранялась приобретенная до извержения аномальная скорость движения пункта, после чего направление вектора скорости вернулось к первоначальному. Таким образом, перемещение пункта отражает процесс подготовки извержения, взрывной и пост-эруптивный процесс, относящийся к извержению вулкана Безымянный 24 декабря 2006 г.

Более подробно результаты наблюдений за движениями земной поверхности в районе вулкана Безымянный, полученные GPS-технологией, обсуждаются в публикации [Serovetnikov et al., 2010].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 40-летнюю историю инструментального изучения СДЗК на Камчатке был пройден большой путь, направленный на повышение точности наблюдений и расширение области мониторинга на всю территорию Камчатского края. Созданная система наблюдений за СДЗК, в которую с 1996 вписалась сеть GNSS-наблюдений, позволяет решать такие геодинамические задачи как:

- определение кинематических характеристик движения глобальных тектонических плит;
- проверка, путем прямых измерений, гипотезы о существовании и характере движения мелких блоков земной поверхности, таких как Охотоморская, Берингская плиты и Командорская микроплита;
- измерение величин скоростей накопления деформаций в сейсмоактивных районах;
- регистрация деформаций, связанных с сильными землетрясениями и проявлениями активного вулканизма.

На 2011 г. в результате реализации нашей долгосрочной программы изучения СДЗК на Камчатке удалось следующее:

- получение физических характеристик и построение модели деформационных процессов при таких природных явлениях как Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 годов и событий в Карымском вулканическом центре 1996–2000 гг.;
- регистрация косейсмических деформаций, сопровождавших Кроноцкое землетрясение 05.12.1997, $M_w = 7.8$, землетрясение у острова Беринга 05.12.2003, $M_w = 6.6$, и Олюторское землетрясение 20.04.2006, $M_w = 7.6$. Они находятся в хорошем согласии со значениями, получаемыми при вычислении по дислокационной модели, использующей опубликованное Гарвардское решение для тензора момента;
- моделирование деформационных процессов в южной части Камчатки по данным постоянных и эпизодических GNSS наблюдений сети КАМ-

NET показало, что главенствующая роль в формировании здесь деформационной картины отводится процессу субдукции Тихоокеанской плиты под Охотоморскую.

Основным инструментом изучения СДЗК на Камчатке в настоящее время стала сеть постоянных и эпизодических GNSS-наблюдений, позволяющая проводить мониторинг за деформационными процессами в оперативном режиме (задержка 2 дня). Продолжаются работы по переводу GNSS-сети в режим высокочастотной односекундной регистрации и организации рутинной кинематической обработки. После многолетнего перерыва продолжены наклономерные наблюдения.

Несмотря на внешнюю, подкупающую собой простоту измерений с использованием GNSS-технологии, ей присущи такие недостатки, как: крайняя сложность высокоточной обработки для целей геодинамики; отсутствие наглядности; меньшая, по сравнению с “классическими” геодезическими методами, точность на малых базах (до 10 км). Поэтому в зонах активного вулканизма и в районах повышенной сейсмичности необходимо развивать и поддерживать измерения с использованием светодальномеров-геодиметров, проводить повторное нивелирование.

Территория, охваченная сетью, имеет крайне сложную деформационную обстановку. Тут происходит взаимодействие четырех литосферных плит: Северо-Американской, Тихоокеанской, Берингской, Охотоморской и Командорским микроблоком. Выходящие на поверхность границы, разделяющие Северо-Американскую плиту с Берингской и Охотоморской, до сих пор не охвачены сетью точных геодезических измерений. В результате вопрос о самостоятельности последних двух блоков до сих пор не имеет окончательного инструментального подтверждения. Уже непростая деформационная картина осложняется процессами активного вулканизма, неоднородностями геологической структуры, неравномерностью накопления напряжений, сопровождающих подготовку крупных сейсмических событий. Данных предоставляемых сетью из 17 постоянных GNSS-станций сейчас явно не достаточно, что, в свою очередь, сдерживает построение точных моделей деформации, требуемых для изучения подготовки и прогноза сильных землетрясений и извержений вулканов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арманд Н.А., Бахтияров 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. Двухволновый лазерный дальномер-рефрактометр // Радиотехника и электроника. 1990. Вып. 11. С. 2420–2426.

Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975–1976 гг. Монография. Изд-во Наука. 1984.

- Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А. и др. Начало формирования единой сети деформационных наблюдений ДВО РАН: задачи, первые результаты, перспективы // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.
- Гусев А.А., Зобин В.В., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Усть-Камчатское землетрясение 15.XII. Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука. 1975. С. 172–184.
- Доброхотов Ю.С. Измерение наклонов земной поверхности высокочувствительными уровнями. Медленные движения земной коры. М.: Наука. 1972. С. 229–238.
- Ландер А.В., Левин В.Е., Титков Н.Н. Современные движения Командорской микроплиты по сейсмологическим и GPS-данным. Вулканизм и геодинамика: материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2009. С. 621–624.
- Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтияров В.Ф., Касахара М. Предварительные результаты GPS-мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 3–11.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф., Павлов В.М., Прилепин М.Т., Титков Н.Н. Современные движения земной коры на Камчатке и их связь с сейсмической и вулканической активностью. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2004. С. 113–135.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф., Павлов В.М., Титков Н.Н. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
- Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Павлов В.М., Титков Н.Н., Сероветников С.С. Предварительные результаты геодинимических исследований Олюторского землетрясения (20.04.06) по данным Камчатской GPS-сети. Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2007. С. 251–262.
- Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Павлов В.М., Титков Н.Н., Сероветников С.С. Геодинимические исследования Олюторского землетрясения 20(21).04.2006 по данным Камчатской GPS-сети // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3. С. 50–59.
- Левин В.Е. GPS мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах 1997–2007 гг. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 60–70.
- Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с $M_w = 7.8$, $I_0 = 8$ (Камчатка). Землетрясения северной Евразии 1997 г. Обнинск: ГС РАН. 2003. С. 251–271.
- Магуськин М.А., Левин В.Е. Геодезический мониторинг деформаций земной коры в Карымском Вулканическом центре. Проблемы эксплозивного вулканизма: материалы международного симпозиума. 2006. С. 157–165.
- Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Титков Н.Н. Деформационные процессы в Карымском вулканическом центре (Камчатка) в 1972–2008 гг. по геодезическим данным. Вулканизм и геодинамика: материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2009. С. 629.
- 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.
- Пинегина Т.К. Сейсмические деформации в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения. Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2007. С. 126–169.
- Стеблов Г.М. Взаимодействие тектонических плит в северо-восточной Азии // Докл. РАН. 2004. Т. 394. № 5. С. 689–692.
- Титков Н.Н., Ландер А.В., Левин В.Е. Современные движения камчатского региона по GNSS-данным. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Вторая региональная научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 11–17 октября 2009 г. Тез. докл. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2009. 167 с.
- Титков Н.Н., Бахтияров В.Ф., Ландер А.В., Полетаев В.А. Оценки деформаций и перемещений по данным наблюдений Камчатской GPS-сети. Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: материалы регионального научного симпозиума. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН. 2010. С. 104–107.
- Федотов С.А., Энман В.Б. Программа геодезических работ по изучению современных движений земной коры на Камчатке // Современные движения земной коры. 1973. № 5. С. 267–273.
- Федотов С.А., Магуськин М.А., Левин В.Е. и др. Деформации земной поверхности на восточном побережье Камчатки и их связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 24–40.
- 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.) / Геол. и геофиз. данные о большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976. М.: Наука. 1978. С. 189–199.
- Burgmann R., Kogan M.G., Levin V.E., Scholz C.H., King R.W., Steblov G.M. Rapid aseismic moment release following the 5 December 1997. Kronotsky, Kamchatka, earthquake // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 1331–1334.
- Gordeev E., Gusev A., Levin V., Bakhtiarov V., Pavlov V., Chebrov V., Kasahara M. Preliminary analysis of deformations at the Eurasia–Pacific–North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. V. 147. 2001. P. 189–198.
- Gusev A. Temporal variations of the coda decay rate on Kamchatka: are they real and precursory? // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 8381–8396.

Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GAMIT Reference manual. GPS Analysis at MIT. Release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 28 October 2010. ftp://chandler.mit.edu/updates/documentation/GAMIT_Ref_10.4.pdf

Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GLOBK Reference manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Tech-

nology. 28 October 2010. ftp://chandler.mit.edu/updates/documentation/GLOBK_Ref_10.4.pdf

Operating Instructions for Model TM-1B Bixial Borehole Tiltmeter. Kinometrics, Inc., California, August, 1975.

Serovetnikov S., Freymueller J.T., Titkov N., Bahtiarov V., Senyukov S. GPS monitoring Bezimyany volcano 2006–2010 (Kamchatka) / AGU Fall Meeting. 2010. 13–17 December, San Francisco, USA.