

GPS МОНИТОРИНГ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАМЧАТКИ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ

Левин В.Е.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, lev@emsd.ru

Введение

В 70-ые годы прошлого века на Камчатском полуострове начались работы по исследованию современных движений земной коры (СДЗК). В программе изучения СДЗК на Камчатке [5] предлагалось исследовать, как горизонтальную, так и вертикальную компоненты СДЗК. Исследования вертикальной составляющей СДЗК предполагалось проводить, применяя нивелиры и наклонометры, а для изучения горизонтальной компоненты – светодальномеры, и скважинные деформометры. С этой целью создавались научно-исследовательские локальные полигоны, приуроченные к районам активных вулканов, таких как Карымский, Толбачик, Ключевской, Авачинский, Ксудач и эпицентральных зонам возможных по долгосрочному прогнозу Федотова С.А. мест сильных землетрясений (Авачинский залив, Кроноцкий залив, Камчатский залив). Для детального изучения горизонтальной компоненты СДЗК на вулканах использовались светодальномеры и теодолиты, что позволяло создавать вокруг вулканов сети триангуляции, трилатерации или их комбинации, а для регистрации вертикальной компоненты применялся метод точного нивелирования. Опыт работы по исследованию горизонтальной компоненты СДЗК при изучении Большого трещинного Толбачинского извержения [6] показал возможность организации разномасштабного мониторинга деформационных процессов при помощи светодальномеров, с применением специальной методики измерений. Поскольку величины деформации СДЗК, связанные с сейсмическими событиями, могут достигать величин от нескольких единиц 10^{-6} до первых единиц 10^{-7} , был организован светодальномерный мониторинг горизонтальной компоненты в районе Авачинского залива из обсерватории Мишенная [1]. За период наблюдений с 1979 по 1999 гг. удалось зарегистрировать деформационные бухты, связанные с сильными землетрясениями, а также деформации, которые согласно современным представлениям, связаны с коллизией литосферных плит в районе южной части Камчатского полуострова и будут обсуждаться ниже. К концу XX века точностные возможности однолучевых светодальномеров для мониторинга СДЗК, ограниченные в 1×10^{-6} , были исчерпаны, а светодальномеры-рефрактометры с точностью 1×10^{-7} в России не вышли из стадии макетных разработок. Для проведения дальнейших исследований СДЗК был совершен переход на использование системы спутникового позиционирования GPS.

Организация сети GPS наблюдений

В начале работ по изучению СДЗК на Камчатке и Командорских островах основные направления наших научных исследований были определены как:

- измерение величин скоростей СДЗК, связанных с сейсмическими событиями;
- изучение СДЗК, связанных с деформационными предвестниками землетрясений;
- измерение СДЗК как проявление перемещения литосферных плит и определение их границ, динамики зон субдукции.

Возникшая в начале 90-ых годов возможность использовать систему спутникового позиционирования GPS в наших целях позволила проводить разномасштабные исследования СДЗК в локальном, региональном и глобальном масштабах.

До 1997 года северная часть Евразии была покрыта станциями GPS крайне неравномерно [8], что создавало значительные ошибки моделирования СДЗК Сибири и Дальнего Востока России. Необходимо было исправить данное положение и не только подключиться к работам мирового научного сообщества установкой GPS станций на Дальнем Востоке, входящих в систему IGS, с шагом 2-3 тысячи км, но и создать свою, более плотную, с шагом 200-300 км, региональную сеть GPS станций. С 1997 года в рамках Геофизической Службы РАН была создана опорная сеть станций GPS по всей территории Северной Евразии - сеть NEDA, охватывающая континент от Восточно-Европейской платформы – через Уральский хребет и всю Сибирь - до Чукотки, Камчатки и Сахалина [4]. Как правило, станции сети NEDA размещены на сейсмостанциях ГС РАН, где обязательным условием является наличие высокоскоростного интернетного канала связи.

Основные задачи, которые приходится решать при создании региональной сети КАМNET, - это организация сети постоянных GPS пунктов, освоение и внедрение в рутинную работу программных средств обработки GPS данных. По полученным данным можно оценить скорости горизонтальных движений пунктов и их связь с геодинамическими и сейсмическими процессами в Камчатской зоне субдукции. При установке GPS антенн был использован опыт создания устойчивых пилонов для светодоальномерных отражателей. Для более полного изучения особенностей геодинамических процессов происходящих на Камчатке и прилегающих территориях целесообразно было совмещать пункты GPS наблюдений с сейсмическими региональными станциями КФ ГС РАН, что и было успешно сделано при организации сети КАМNET. Начиная с 1997 года GPS сеть КАМNET начала функционировать и вошла составной частью в мировой систему для локальных, региональных и глобальных наблюдений за СДЗК.

В сеть КАМNET входят как постоянные, так и временные GPS станции. Постоянные GPS станции установлены с шагом примерно в 200 км и совмещены с сейсмостанциями КФ ГС РАН (Паужетка, Петропавловск, Ключи, Эссо, Крутоберегово, Беринг) или метеостанциями ГМС (Петропавловск-Маяк, Тигиль, Водопадный). В предполагаемых эпицентральных зонах сильных ($M > 7.0$) землетрясений и районах активных вулканов станции установлены с шагом 10-30 км, для этого используются как постоянные, так и временные GPS станции. По существу GPS-сеть КАМNET, созданная на Камчатке и Командорских островах для изучения современных движений земной коры, представляет собой “многобазовый деформограф”, чувствительность которого может варьировать в пределах от $5 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-9}$ в зависимости от выбираемой длины базы. Постоянные GPS станции сети КАМNET являются опорными при обработке данных, полученных с локальных GPS сетей, таких как сеть на вулкане Карымский [1].

Для высокоточной регистрации СДЗК пункты GPS оснащены приемниками геодезического класса Ashtech Z-12, Lexion, Legacy и антеннами типа Choke Ring. Антенны установлены на специально подготовленных пунктах или на крышах бетонных сооружений. С возрастанием точностей наблюдений возникают повышенные требования к создаваемым пунктам для установки аппаратуры, в частности, GPS антенн. Необходимым условием работы GPS станции, входящей в сеть мониторинга за современными движениями земной коры, является жесткая и однозначная фиксация приемной антенны для исключения собственных колебаний антенны, связанных с воздействием внешних факторов.

Геодезический пункт для GPS наблюдений представляет собой инженерное сооружение из железобетона (рис.1), заглубленное и закоренное в грунте, имеющее высоту над дневной поверхностью земли, исключающую заметание антенны снегом и перекрытие горизонта растительностью или строениями. Пункт имеет геодезический центр и систему ориентации, позволяющей однозначно устанавливать антенну в рабочем положении. Как вариант используются геодезические центры, заложенные на крышах монолитных зданий. Этот вариант установки существенно упрощает структуру GPS станции, а также организацию передачи данных, ввиду наличия инфраструктуры, но существенно повышается риск потери пункта в результате сильного землетрясения в том случае, если здание получит повреждения фундамента или несущих конструкций. Именно это и произошло с отдельными пунктами нашей GPS сети в Корякии при Олюторском землетрясении в 2006 году. На настоящий момент времени создана GPS сеть ГС РАН. За прошедшее десятилетие работы региональной сети КАМNET получены довольно интересные результаты изучения СДЗК на Камчатке и Командорских островах.

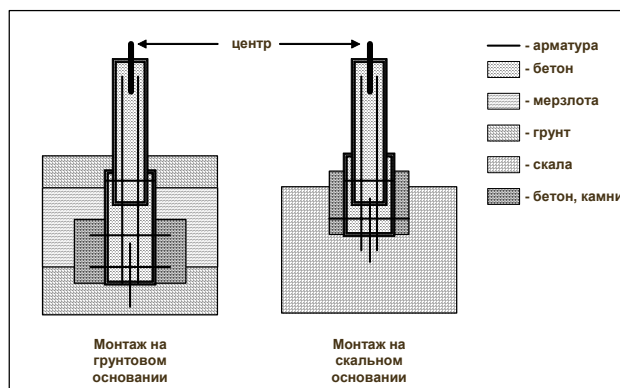


Рис. 1. Устройство пункта GPS.

Измерение величин скоростей СДЗК, связанных с сейсмическими событиями

Созданная система КАМNET позволила зарегистрировать СДЗК от трех произошедших в регионе за этот период землетрясений, таких как Кроноцкое, землетрясение 05.12.2003 $M_w=6.6$ и Олюторское. СДЗК для данных землетрясений зарегистрированы в виде косейсмических скачков, пресеismicких и монотонных постсейсмических сигналов [1,2].

Измеренные косейсмические деформации, связанные с данными землетрясениями, находятся в хорошем согласии с теми значениями, которые получены при вычислении по дислокационной модели, использующей опубликованное Гарвардское решение для тензора момента [1]. Этот факт имеет большое значение, так как он подтверждает надежность как системы GPS измерений, так и хорошую точность данных, полученных в измерениях на коротких интервалах времени. Кроме того, регистрация и изучение косейсмических процессов позволит при наборе определенной статистики уточнить радиусы зон деформаций, что важно для уточнения карт сейсмического районирования.

Пресеismicкий сигнал, который можно рассматривать, как предвестник сильного сейсмического события, наиболее ярко, зарегистрирован GPS сетью KAMNET от Кроноцкого землетрясения, в виде «деформационной бухты» смещения пункта KBG (рис.2).

Продолжительность предвестника с амплитудой до 20 мм около месяца.

Постсейсмические движения имеют гораздо более обыкновенный характер. Они хорошо соответствуют идее медленного крипового продолжения скольжения по площадке очага "быстрого" землетрясения с сохранением направления скольжения. Суммарное движение превышает величину для "быстрого" землетрясения [9].

СДЗК, как проявление перемещения литосферных плит и определение их границ, динамика зон субдукции

Северо-Восточная Азия и Берингово море остается одним из крупнейших регионов, по которым пока нет определенности в конфигурации плит. Данная область обделена инструментальными исследованиями в связи с труднодоступностью и отсутствием инфраструктуры. Произошедшее в 2006 г. Олюторское землетрясение дало толчок к развитию сети KAMNET в северной части Камчатского Края (Корякского нагорья) с целью инструментального определения границ Берингийской плиты, существование которой в этом регионе обнаруживается проявлениями местной сейсмичности [7]. GPS измерения к настоящему времени проводятся на нескольких пунктах в Коряки и Чукотке, а также на островах Алеутской дуги и Аляски.

По направлениям векторов среднегодовой скорости смещения «северных» пунктов сети KAMNET (рис.3) можно сделать заключение, что пункты OSSO и KMS принадлежат Североамериканской (NAM), а TIL к Берингийской плите (BER), что позволяет провести межплитовую границу. Итак, по данным сети KAMNET граница между Североамериканской и Берингийской плитами расположена в области наших GPS исследований, а зона разлома Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г. точно соответствует этой гипотезе и может рассматриваться как проявление сегмента названной границы.

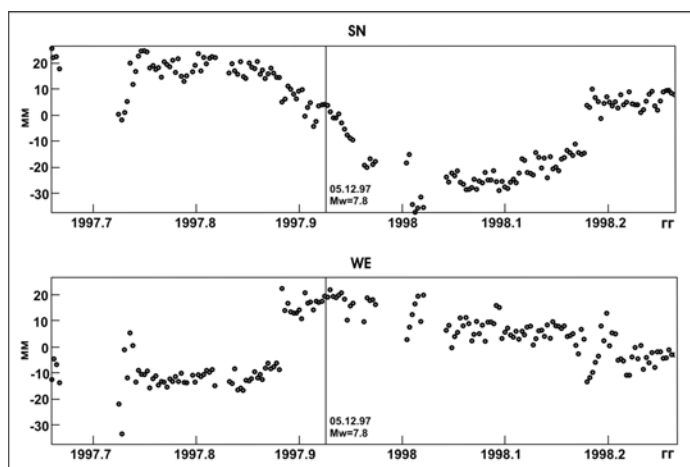


Рис. 2. Деформации земной поверхности, зафиксированные на GPS станции KBG во время подготовки и развития очага Кроноцкого землетрясения.

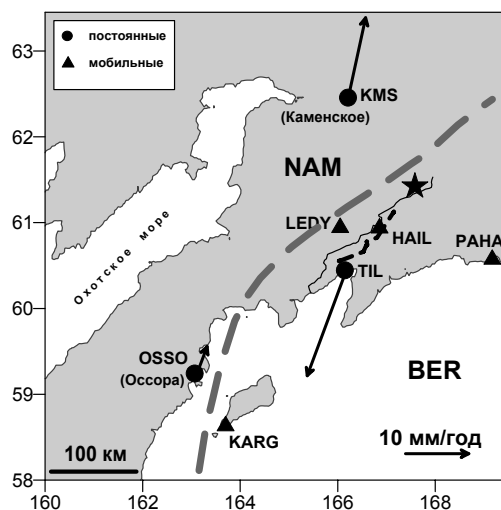


Рис. 3. Положение пунктов в КАО сети KAMNET. Стрелка – векторы скоростей, крупный пунктир – предполагаемая граница Берингийской плиты, мелкий пунктир – разлом по данным Т. Пинегиной [3], звездочка – эпицентр землетрясения.

Измеренные скорости смещения пунктов GPS сети КАМNET, как проявление перемещения литосферных плит, приведены на рис. 4. Сопоставление теоретических скоростей движения с измеренными представляет особый интерес в зонах субдукции, где подобный анализ позволяет исследовать глубинное строение такой зоны. Сейсмофокальная зона обычно интерпретируется как плоскость взаимодействия сдвигающихся плит. Распределение скоростей в такой зоне можно определить методом дислокаций, полагая, что на этапе сейсмического цикла, когда накапливаются напряжения, обе сдвигающиеся плиты механически сомкнуты до определенной максимальной глубины. Такой подход был применен для анализа поддвига Тихоокеанской плиты под Североамериканскую в районе Аляски [10]. Аналогичная геометрия в применении к Камчатской зоне взаимодействия Тихоокеанской плиты с Евразией показана на рис. 5. Сравнение теоретических скоростей $V_y(y)$ с реально измеренными на поверхности скоростями GPS позволяет решить обратную задачу определения глубины и протяженности механически сомкнутой зоны.

Из сопоставления экспериментальных данных и теоретических кривых следует, что максимальное значение протяженности «механически сомкнутой зоны» составляет около 40 км [4]. При

$$V_y(y) = -\frac{b}{\pi} \left\{ \frac{[S_2 - (y+c)\cos\delta] S_2 \sin\delta}{(y+c)^2 + S_2^2 - 2(y+c)S_2\cos\delta} + \cos\delta \left(\arctg \frac{y+c - S_2\cos\delta}{S_2\sin\delta} - \frac{\pi}{2} \right) \right\}$$

внимательном рассмотрении картины распределения векторов движения пунктов сети КАМNET на рис. 4, можно заметить медленное уменьшение скоростей с востока на запад для южной части Камчатки и значительное для северной части. Такая закономерность распределения измеренных

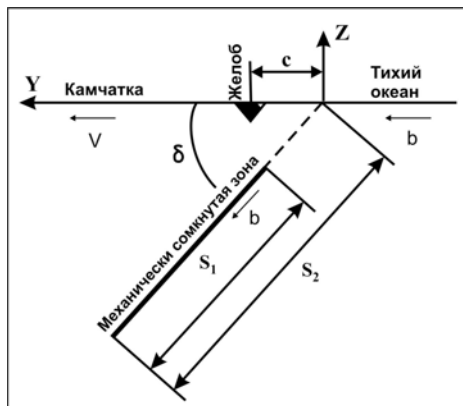


Рис. 5. Схема зоны субдукции.

скоростей смещений позволяет предположить, что смыкание плит в южной части камчатской зоны субдукции более сильное и нет проскальзывания, в то время как для северной части проскальзывание возможно происходит, что может служить подтверждением гипотезы «клавишной модели». Обнаруженный эффект сильного и без проскальзывания смыкания Тихоокеанской плиты с Евразийской в южной части камчатской зоны субдукции, отвечает на вопрос о возможной причине уменьшения амплитуды, зарегистрированных при светодальномерном мониторинге СДЗК упругих бухтообразных вариаций деформаций района Авачинского залива, связанных с землетрясениями 17.08.1983 ($M_w=7.8$), 2.03.1992 ($M_w=7.0$), 5.12.1997 ($M_w=6.8$) (рис. 6). По всей видимости, до начала наших работ по мониторингу деформаций района Авачинского залива при сильных землетрясениях 24.11.1971 и 15.12.1971 года ($M=7.3$ и $M=7.8$) была сброшена значительная часть напряжений в регионе, поэтому начавшийся в 1979 году мониторинг СДЗК смог зарегистрировать деформационную бухту значительной амплитуды, связанную с землетрясением 1983 г. С течением времени напряжения сжатия в исследуемом регионе из-за подвига Тихоокеанской плиты под Камчатку возрастали, и это определило уменьшение амплитуды регистрируемых деформационных бухт от последующих сейсмических событий. Этот эффект хорошо виден на графике измерения линии L8, ориентированной вкrest фокальной зоны (рис.6).

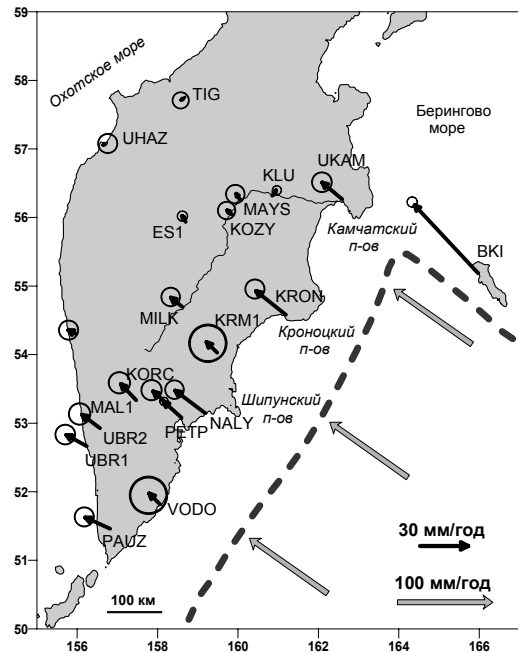


Рис. 4. Скорости GPS пунктов сети КАМNET относительно Северной Америки. Черные стрелки – скорости пунктов, кружки – ошибка измерения скорости, серые стрелки – направление сближения плит, пунктир – фокальная зона

Заключение

На Камчатке и Командорских островах создана и развивается региональная GPS сеть КАМNET, которая позволяет решать задачи мониторинга СДЗК регионального и глобального масштабов и, в частности, вносит лепту в понимание конфигурации и кинематики тектонических плит Земли, что является одной из основных проблем в такой области знаний, как наука о Земле. Среди научных задач решаются, такие задачи как определение деформационных предвестников с целью прогноза землетрясений и извержения вулканов, изучение механизма очага и релаксационных процессов постсейсмических событий. Параллельно решаются научно-практические задачи. Так, продолжительные ряды данных сети КАМNET дают важный цифровой материал по эволюции деформационных характеристик региона (главные деформации, деформации сдвига) и, в перспективе, будут получены данные о размерах деформируемых зон, что может быть учтено при составлении карт сейсмического районирования, а измеренные скорости GPS пунктов позволят составить детальные карты современных движений. Кроме того изучение изменений скорости линейной деформации по всей сети даст материал для оценки магнитуды готовящегося землетрясения (по размеру площади, на которой проявляются деформации). Проводимые GPS исследования СДЗК важны для оценки опасности землетрясений в регионе Камчатки, Командорских островов и Берингова моря. Данные районы имеют низкую плотностью населения, но люди, которые живут здесь, в решающей степени зависят от устойчивости инфраструктуры, которой может быть нанесен серьезный ущерб в результате землетрясений.

Список литература

1. 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.
2. Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Павлов В.М., Титков Н.Н., Сероветников С.С. Предварительные результаты геодинимических исследований Олюторского землетрясения (20.04.200606) по данным камчатской GPS сети. // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. (290 с.) С. 251-262.
3. 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. (290с.) С. 126-269.
4. Стеблов Г.М. Взаимодействие тектонических плит в северо-восточной Азии. // Докл. Академии Наук, 2004. Т.394. №5. С. 689-692.
5. 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.
6. 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.) // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975-1976 гг. М.: Наука, 1978. С.189-199.
7. Lander A.V., Bukchin B.G. Tectonic position and source parameters of Koryakiya (Khailino) earthquake, March 8. 1991 in framework of problem of present day Beringia plate existence // Abstracts of 4-th L.P.Zonenshain Memorial Conference on Plate Tectonics. Moscow. 1993.
8. Argus D.F., Heflin M. B. Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System // Geophys. Res. Letters. 1995. V 22. N 15. Pp. 1973-1976.
9. Gordeev E., Gusev A., Levin V., Bakhtiarov V., Pavlov V., Chebrov V. and M.Kasahara. Preliminary Analysis of Deformations at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V.47, Pp.189-198.
10. Savage J.C., Svarc J.L., Prescott W.H. // Geophys. Res. Lett. 1999. V.26. Pp. 2117-2120.

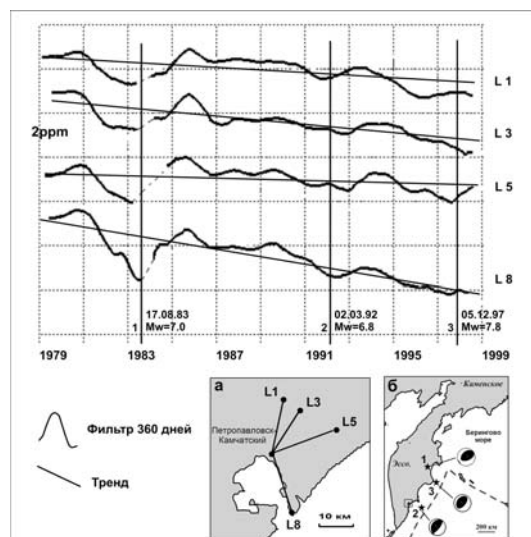


Рис. 6. Графики линейных измерений из обсерватории Мишенная, где вертикальными линиями обозначены моменты землетрясений. На врезках: а – схема расположения линий. б – эпицентры и механизмы землетрясений; пунктирная линия –фокальная зона.