

# Картографо-геодезические и географические основы мониторинга земной поверхности

Г.Д. Курошев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: KGD@GK6816.spb.edu

Объективная необходимость изучения изменений географической оболочки Земли в пространстве и времени определяется в настоящее время задачей эффективного управления территориями. Хорошо известна роль природных и техногенных явлений в эволюции ландшафта (земной поверхности). Такие явления рассматриваются преимущественно как опасные для населения. Прогнозирование возможных негативных проявлений геодезических и техногенных явлений при современном научном и техническом уровнях является вполне реальным. Непосредственному метрическому изучению геодезическими методами динамики Земли доступна только поверхность земной коры и поверхность мирового океана. Рассмотрим кратко методологические подходы к такому прогнозированию. В 1978 г. Л. П. Пеллинен [1] сформулировал четыре группы проблем, возникающих при изучении геодезических явлений геодезическими методами:

- развитие средств для измерений очень высокой точности;
- изучение зависимостей наблюдаемых вариаций координат и элементов гравитационного поля Земли от различных геодезических явлений;
- разработка требований к частоте и продолжительности наблюдений и к размещению точек наблюдения для определения полного пространственно-временного спектра геодезических явлений;
- создание математического аппарата геодезических исследований, включая выбор систем отсчета для их определения.

Решение обозначенных проблем сдерживалось следующими причинами.

Для уверенного определения линейных сдвигов за несколько лет необходима точность порядка нескольких сантиметров, что при расстояниях в несколько сот километров 30 лет назад обеспечивал лишь метод геометрического нивелирования.

Изучение сложной совокупности различных геодезических факторов, влияние которых иногда вообще невозможно разделить, требует применения новых видов измерений.

Пространственно-временной спектр большинства геодезических явлений весьма широк. Для уверенного их исследования необходима достаточно обширная сеть станций, охватывающая весь земной шар. С другой стороны, требуются длительные однородные ряды измерений, чтобы хорошо изучить вековую и долгопериодическую части геодезических явлений, и в то же время достаточно плотные, чтобы изучить такие явления, как недельные или суточные вариации. Идеальным решением задачи является создание постоянно действующих геодезических обсерваторий и служб, подобно действующим сейчас службам изучения изменений широты, неравномерности вращения Земли и приливных вариаций (IERS). С точки зрения разделения влияния различных геодезических факторов желательно, чтобы на геодезических обсерваториях имелся обширный комплекс различных средств наблюдения как классических, так и новейших космических.

Признано, что для геодезических исследований необходимы две системы координат:

- инерциальная, реализуемая с точностью в радианной мере порядка  $10^{-9}$  путем определения направлений на весьма удаленные внегалактические источники излучения;
- земная, определяемая с точностью порядка сантиметра и связанная с некоторой идеальной Нормальной Землей.

Для геодезических исследований только за последнее десятилетие XX в. предложено 3 модели.

Геолого-геофизическая модель NUVEL-1 (1991 г., с фиксированной Тихоокеанской плитой). Модель NNR-NUVEL-1A (1994 г., No-net-rotation), основанная на принципе отсутствия глобального вращения, по параметрам относительной кинематики 16 плит. В 1998 г. появилась модель Германа Древеца (H. Drewes – Arkim 2000.0), построенная по данным методов космической геодезии VLBI, GPS, SLR. В модели Arkim 2000.0 для вычисления параметров кинематики плит были использованы геодезические данные об абсолютных скоростях движения плит [2].

Первые практические результаты геодезических измерений с помощью спутниковых радионавигационных систем второго поколения – американской системы GPS (NAVSTAR) и советской системы ГЛОНАСС показали точности, превышающие точность методов классической геодезии, наряду с повышением производительности спутниковых технологий, по сравнению с обычными технологиями, в 10-15 раз.

В настоящее время с высокой точностью определены фундаментальные геодезические постоянные, определяющие геодезическую отсчётную систему [3]. В их основу положены природные физические величины, то есть величины, имеющие физический смысл (скорость вращения Земли) и величины, определяемые однозначно без предварительных условий. Теперь можно следить за их изменениями через 10, 100, 1000 лет. По существу эти данные являются законом для других наук о Земле. Основные задачи фундаментального координатно-временного обеспечения решаются использованием современных быстро развивающихся космических технических средств: радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой- РСДБ (VLBI), лазерной локации искусственных спутников Земли (SLR), глобальных систем позиционирования (GPS), доплеровской орбитографической радиопозиционной интегрированной спутниковой системы (DORIS). Эти технологии используются для решения задач, включающих в себя [4]: установление небесной опорной системы координат; установление земной опорной системы координат; определение параметров ориентации этих систем – постоянный мониторинг вращательного движения Земли. К параметрам ориентации Земли (ПОЗ) относятся: координаты полюса, всемирное время, прецессия и нутация.

Международная служба вращения Земли (International Earth Rotation Survey - IERS) публикует ежегодные данные о ПОЗ в отчётах, месячных и еженедельных бюллетенях.

Кроме IERS функционируют ещё три международных службы определения ПОЗ. Для повышения эффективности использования системы GPS в фундаментальных научных исследованиях динамики и физики Земли Международная ассоциация геодезии (IAGG) в 1994 году организовала специальную GPS-службу для геодезии - МГС (IGS) - International Positioning System (GPS) Service for Geodynamics). В настоящее время в МГС функционирует более 350 постоянно действующих станций.

Плотность сети неравномерная. Наибольшая плотность в Западной Европе, США, Японии. В России с 1993 г. Институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) осуществляется программа по созданию сети пунктов GPS - имеются две основных станции (Менделеево и Иркутск) и около десятка опорных станций. Ещё две международных службы, организованные позднее МГС и определяющие ПОЗ: РСДБ (International VLBI Service – IVS) и лазерной локации (International Laser Ranging

Service - ILRS). Метод РСДБ является наиболее универсальным и единственным, который позволяет независимо и с высокой точностью определять весь набор ПОЗ [5]. Наибольшую активность в развитии техники РСДБ проявляют США, Европа и Япония. В России два научных центра участвуют в IVS программах: Институт прикладной астрономии РАН и Астрономический институт СПбГУ. Институт прикладной астрономии ведёт строительство комплекса «Квазар» в составе трех радиотелескопов: в поселке Светлое Ленинградской обл., в пос. Зеленчукская на Северном Кавказе и в урочище Бадары возле оз. Байкал. Большинство станций РСДБ совмещено с другими средствами космической геодезии — GPS, DORIS, SLR и образует Международную земную опорную сеть (International Terrestrial Reference Frame - ITRF), которая реализует Международную земную систему координат (ITRS). Сети ITRF периодически перенаблюдаются, имеют реализацию на различные периоды времени (ITRF -84, ITRF -94, ITRF -96, ITRF -2000 и т.д.) и поддерживаются IERS. Таким образом, координаты наземных пунктов являются функцией времени.

Повышение точности спутниковых измерений за последнее десятилетие открыло возможность более детального изучения скорости вращения Земли, закономерностей движения её полюсов, деформаций земной коры и др. Среди различных видов мониторинга земной поверхности с применением спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС можно выделить [6]: мониторинг международной земной отсчетной основы ITRF, включающий мониторинг тектонических плит, параметров ориентировки Земли, параметров движения спутников GPS и ГЛОНАСС; региональные геодезические сети с размерами порядка 100-1000 км; локальный геодезический мониторинг земной поверхности, уровня воды, поверхности снега (льда), движения ледников, деятельности вулканов и т. п. Размеры таких сетей обычно менее 100 км. Все эти виды мониторинга требуют наивысшей точности наблюдений. Наблюдения в региональных и локальных сетях мониторинга обычно проводятся либо циклами, либо непрерывно, либо применяется смешанная технология работ.

В последнее десятилетие во многих странах создано новое поколение государственных геодезических сетей - постоянно действующих станций для спутниковых дифференциальных определений. В России также имеется опыт создания и использования таких станций. С 1996 по 2003 г. на более 40-а пунктах Геодезической сети г. Москвы выполнено более 10 циклов спутниковых наблюдений. В Москве создана спутниковая система межведения земель (проект «Москва») из 22 станций. Мониторинг координатной основы предусматривает периодическое определение координат всех референчных станций в координатной системе сети ITRF2000 [7].

Для изучения локальных деформаций земной поверхности начинает использоваться метод космической радиолокационной дифференциальной интерферометрии (КРДИ) [8]. Результаты использования метода КРДИ широко освещаются в периодически издаваемых «Записках геофизических исследований» и др. научных журналах. Метод КРДИ использовался при исследовании деформаций земной поверхности различного генезиса. Например, после сильных землетрясений [9], при добыче полезных ископаемых (воды, нефти, угля) [10], для изучения деформаций земной поверхности городов [11].

Значительная и постоянно возрастающая информация о кинематике точек на земной поверхности, обширные геологические и геофизические данные требуют создания системы картографического обеспечения геодезических исследований, которая позволила бы выявлять изменения регистрируемых геодезических параметров и их пространственно-временные особенности. В полной мере это может быть обеспечено только с использованием ГИС технологий, что позволит проводить геодезический мониторинг на глобальном, региональном и локальном уровнях, обновлять базы данных, систематизировать и визуализировать полученные результаты в виде различных тематических карт, выявлять взаимодействия различных геодезических явлений. Картографическое сопровождение должно быть составной частью такой ГИС. В Санкт-Петербургском государственном университете имеется опыт картографирования геодезических процессов [12]. Ниже на рисунках приведены карты, составленные по данным отдельных систем космической геодезии.

Структура картографируемых объектов на глобальном и региональном уровнях может включать: литосферные плиты, землетрясения и их параметры, результаты геодезического моделирования (невязки наблюдаемых и модельных скоростей). Выбор масштаба картографируемой территории зависит от картографируемой территории; плотности исходных данных; обеспечения визуального восприятия различий в картографируемых показателях. Содержание карт должно включать общегеографическую, геологическую, геофизическую и геодезическую информацию. Роль общегеографической основы традиционна - обеспечить привязку всего содержания карты. Геологические и геофизические элементы призваны подчеркнуть наличие корреляции с геодезическими параметрами.

Раздельному картографированию могут подлежать различные виды движений и деформаций литосферных плит (горизонтальные, вертикальные, вращения и т.д.).

По способам картографического изображения геодезические карты сравнительно просты: это точечный способ, способ линейных знаков, знаков движения, ареалов. Обусловленное этим сравнительное геофизическое однообразие предъявляет особые требования к дизайну карт и выбору количественных шкал, которые должны обеспечить должную читаемость карт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

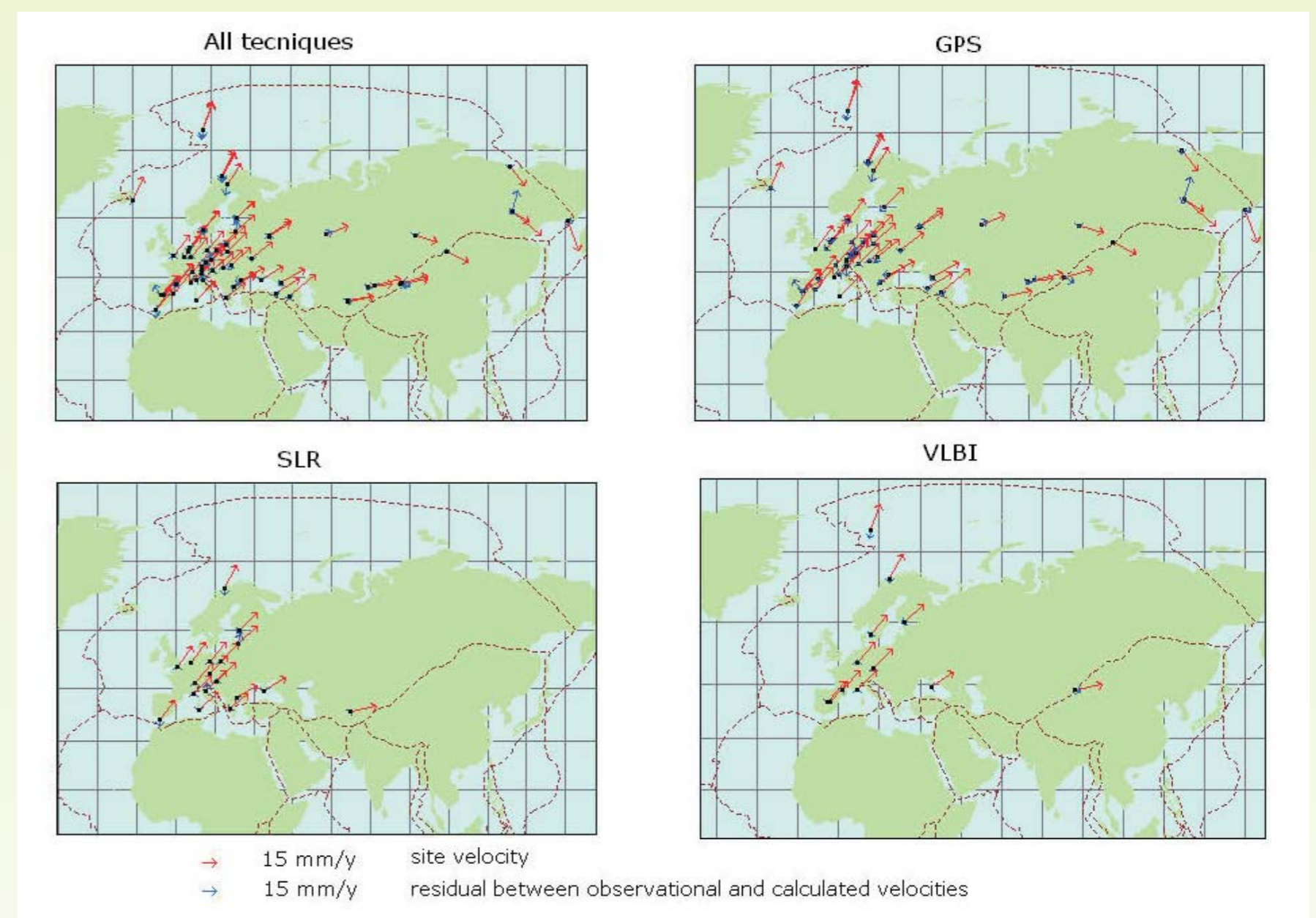
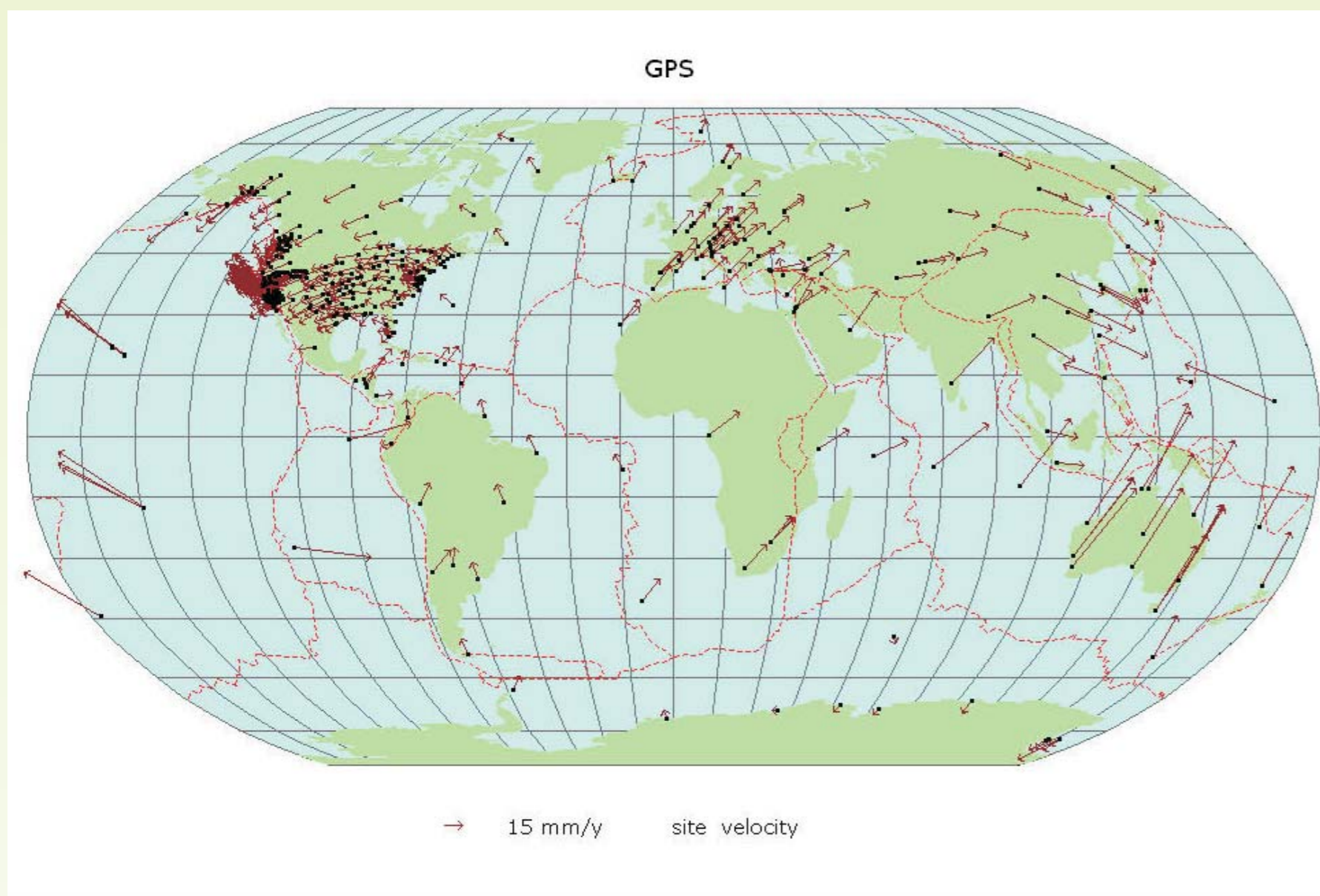
Новые возможности измерительных средств, обеспечивают субсантиметровые точности при определении подвижек любой точки на земной поверхности с временным разрешением 1-3 дня.

Важнейшим вкладом космической геодезии в глобальную тектонику стало подтверждение достоверности кинематических моделей движений литосферных плит, построенных по осредненным за миллионы лет геологическим данным.

Наличие глобальной сети станций, поддерживающих систему ITRF, позволяет оперативно определять координаты в любом месте земного шара.

Создание в крупных городах сетей постоянно действующих референчных станций, обеспечивает проведение мониторинга земной поверхности различного генезиса на локальном уровне с точностью первых миллиметров. Мониторинг с достаточно высокой точностью можно проводить методом космической радиолокационной интерферометрии.

Для максимальной информативности мониторинг за земной поверхностью на всех уровнях должен сопровождаться интегрированным с ГИС картографическим обеспечением.



## Литература

1. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия) М., Недра, 1978. 264 с.
2. Drewes H. Combination VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models. In: M. Feissel (Ed.): Geodynamics LAG Symposia, Springer 1998.
3. Бурша М. Фундаментальные геодезические постоянные // Геодезия и картография. 1996, № 5. С. 15-22.
4. Татевян С.К. Роль космической геодезии в решении глобальных геодезических задач (основные результаты) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1998. № 4-5. С. 128-129. 5. Курошев Г.Д. Некоторые тенденции развития географии, геодезии и картографии. Геоэкологический мониторинг: теория и практика. Сб. научных статей по материалам отчётной научно-практической конференции 2002 г. СПб. 2003. С. 52-62.
6. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр» 2005.
7. Бойков А.В. Теоретические основы и практическая реализация координатного обеспечения спутниковой системы межведения земель (ПРОЕКТ «МОСКВА») Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. М. 2008 г.
8. Gabriel, A.K., R.M. Goldstein, and H.A. Zebker, Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research, v. 94, p. 9183-9191, 1989.
9. Ozawa, S., Murakami M., Fujiwara S., and M. Tobita. Synthetic aperture radar interferogram of the 1995 Kobe earthquake and its geodetic inversion // Geophysical Research Letters. 1997. N° 24. P. 2327-2330.
10. Fielding, E.J., Blom, R.G., and Goldstein, R.M., 1998. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry: Geophysical Research Letters, v. 27, p. 3,215-3,218.
11. Mouelic Le, S., Raucoules, D., Carnec, C., King, C. A Least Squares Adjustment of Multitemporal InSAR Data: Application to the Ground Deformation of Paris // PhEngRS(71), No. 2, February 2005, pp. 197-204.
12. Данилова И.Е. Картографирование геодезических процессов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата географических наук. СПб. СПбГУ 2005. С. 16.