

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ТВЕРДОЙ ЗЕМЛИ

С.К. Татевян

*Институт астрономии РАН
119017 Москва, Пятницкая 48
e-mail: statev@inasan.ru*

В последнее десятилетие явно проявилась устойчивая тенденция проникновения теорий и методов космической геодезии во многие смежные научные направления: в геофизику, геологию, тектонофизику, метеорологию, атмосферные и планетные исследования. Особенно эффективно это сказалось в области изучения короткопериодических процессов, происходящих на поверхности и в теле Земли. Учитывая особенности технологии космической геодезии, прежде, чем подойти к изучению геофизических и геодинамических явлений, необходимо решить ряд чисто геодезических и небесно-механических задач. В первую очередь, это создание единой координатной системы, жестко связанной с Землей, и сети пунктов-реперов, относительно которых будут проводиться все региональные и локальные измерения различного рода подвижек, их сравнение по амплитуде, периоду, направлению и другим параметрам. Большим преимуществом спутниковых методов измерений, особенно с использованием спутниковой Глобальной Позиционной Системы (GPS), является их высокое разрешение, позволяющее определять изменения координат пунктов наблюдения и параметров ориентации Земли на временных интервалах в 1 сутки с точностью около 1 см. С использованием этих измерений была подтверждена концепция глобальной тектоники. В том числе, они позволили построить новую кинематическую модель движения литосферных блоков Евразии, которая предсказывает пространственную и временную эволюцию региона, и используются для выделения областей с максимальными значениями скоростей сдвиговых деформаций земной коры, что необходимо при определении мест подготовки сильных землетрясений.

Широкое внедрение спутниковых методов для исследований трехмерной геодинамики и оценки ресурсной емкости Земли привело к существенному пересмотру традиционных представлений о неподвижности структур Земли, в которых признаки активности носят якобы только локальный эпизодический характер. Впервые получены количественные оценки, подтверждающие концепцию глобальной тектоники, горизонтальных движений литосферных плит и взаимозависимость динамических процессов, происходящих в теле Земли и на ее поверхности.

Успешная реализация этого нового направления в науках о Земле в значительной степени зависит от степени развития теоретических методов и технических средств космической геодезии, в основе которых (за исключением длинно-базисной радиоинтерферометрии), лежат высокоточные измерения параметров орбит искусственных спутников Земли геодезического назначения. Поскольку искусственный спутник обращается вокруг Земли и находится в ее гравитационном и магнитном полях, то все результаты детальных исследований его орбитального движения имеют самое прямое отношение к пониманию физических и динамических свойств околоземного пространства и самой планеты.

Наиболее значительный, уникальный, вклад техника космической геодезии вносит в изучение:

а) изменений уровня Мирового океана, являющихся важнейшими признаками глобальных изменений климата, геодезический мониторинг которых необходим для разделения действительных геофизических сигналов от случайных колебаний со сравнимыми амплитудами;

б) послеледниковой отдачи/поднятий земной коры, что тесно связано с проблемой эластичной структуры и конвекции в мантии;

в) глобальных и региональных тектонических движений и деформаций, которые являются прямыми индикаторами динамических характеристик земной коры и мантии и которые до сего времени было абсолютно невозможно количественно оценить на коротких интервалах времени.

Большим преимуществом космических средств измерений является их высокая точность (Табл.1) и разрешение, позволяющее определять малые изменения в геоцентрических координатах наземных пунктов и в параметрах ориентации и скорости вращения Земли.

Сравнительный анализ различных измерительных данных Международной Службы Вращения Земли показывает, что угловая скорость Земли (Всемирное Время-UT1) регулярно определяется с точностью 0.03 миллисекунды (что равноценно 1,4 см на экваторе) и 0,3 миллисекунды дуги для координат полюса Земли (1 см с разрешением 1 день). По данным той же службы, которая ведет постоянный контроль точности построения общеземной геоцентрической системы координат, удалось установить, что начало этой системы, закрепленной на поверхности Земли сетью пунктов, фиксированных в земной коре, колеблется относительно центра масс Земли с амплитудой 1-3 см в год.[1] Причиной таких колебаний может являться любое перемещение масс в системе Земля. (Рис.1).

Таблица 1. Точности определения параметров Земной системы координат (ITRF 97) по данным различных техник космической геодезии.

Начало координат	~ 20 мм	x, y
Масштаб	~ 40 мм	z
	$2 \cdot 10^{-9} \sim 12$ мм (на поверхности Земли)	
Отдельные решения		
Координаты: σ (ср.кв.ош.)	3-5 мм 4- 20 мм 3-8 мм 25-30 мм	РСДБ Лазер. дальн. GPS ДОРИС РСДБ
Скорости: σ (ср.кв.ош.)	1 мм/Г 1-3 мм/Г 10 мм/Г	Лаз.даль.,GPS ДОРИС

В качестве иллюстрации вышесказанного на рис 2 показаны кривые изменений положений «геоцентра» (три компоненты координат), вычисленных в Институте астрономии РАН по данным измерений на станциях глобальной сети Международной GPS службы для геодинамики за последние 10 лет. Используемая в ИНАСАН версия программного пакета GIPSY-OASIS в операционной системе Linux, разработанная в Калифорнийском Технологическом институте, позволяет быстро обрабатывать большие массивы данных траекторных измерений спутниковых микроволновых систем GPS, DORIS и ГЛОНАСС. [2] Методика вычислений (более подробно описанная в работах [3,4], состоит в следующем. По результатам ежедневных измерений (суточные файлы) большого числа (не менее 40) работающих на данный момент станций глобальной сети, вычисляются трехмерные координаты станций, орбитальные параметры спутников, параметры вращения Земли, тропосферная рефракция и ряд других величин. Затем суточные решения объединяются в недельные решения и трансформируются в «хорошо» определенную (на текущую эпоху) систему координат – ITRF (International Terrestrial Reference Frame). В процессе трансформирования оцениваются 7 параметров трансформации, из которых 3 линейных параметра сдвига начала координат (dx , dy , dz) и масштаб (s) являются более значимыми, по сравнению с 3-мя оставшимися параметрами поворота начала системы координат, так как обеспечивают информацию о нулевой точке координатной системы. Для оценки годовых, полугодовых и сезонных амплитуд вариаций положения геоцентра применялся регрессионный и гармонический анализ. Показано, что амплитуды годовых и полугодовых вариаций геоцентра колеблются от 4 до 18 мм по всем трем компонентам координат, причем Z составляющая всегда в 2-3 раза выше планарных составляющих. Одной из причин таких расхождений может быть недостаточное количество обработанных данных и неравномерное распределение наблюдательных станций в наземных сетях, что влияет на точность определения положения исходного пункта системы координат. Кроме того, большая амплитуда Z компоненты может быть следствием сезонного перераспределения масс между Южным и Северным полушариями. Аналогичные вычисления были проведены с использованием 10-летних рядов лазерных локационных измерений и данных спутниковой орбитографической системы DORIS. [5,6] Полученные результаты хорошо согласуются и амплитуды вариаций положения геоцентра отличаются незначительно. Следует отметить, что для всех типов измерений обнаруживается отчетливый вековой тренд в движении геоцентра с амплитудой 1.2 – 4.8 мм за год, при этом наименьший - для лазерной локации. Можно предположить, что наличие тренда указывает на недостаточность геофизических моделей, используемых для учета атмосферных и приливных нагрузок, а также тропосферной рефракции при обработке радиотехнической измерительной информации.

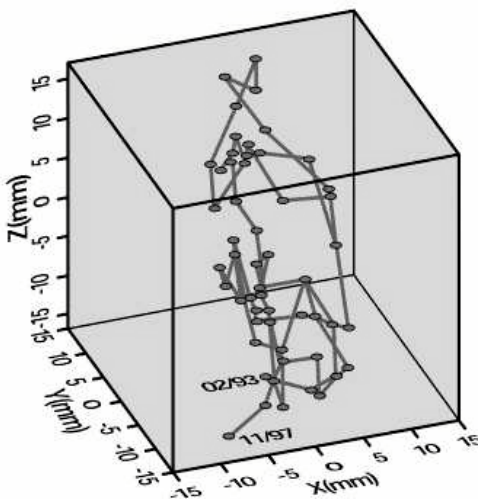


Рис. 1. Движение геоцентра

На практике, из-за отсутствия достоверной модели движений геоцентра, при проведении измерений различного рода перемещений по поверхности Земли, в качестве начала системы координат принято использовать некое среднее положение «геоцентра» на начало каждого года. Более продолжительные исследования в этом направлении позволят построить прогнозные модели движения «геоцентра» и выработать рекомендации по учету периодических поправок в положение исходного начала общеземной опорной системы координат при проведении высокоточных измерений разномасштабных перераспределений масс внутри Земли и на ее поверхности.

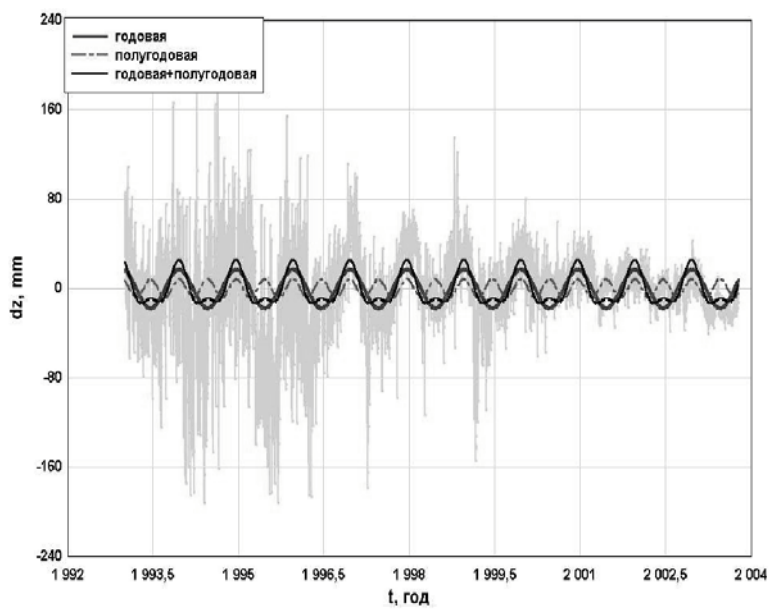
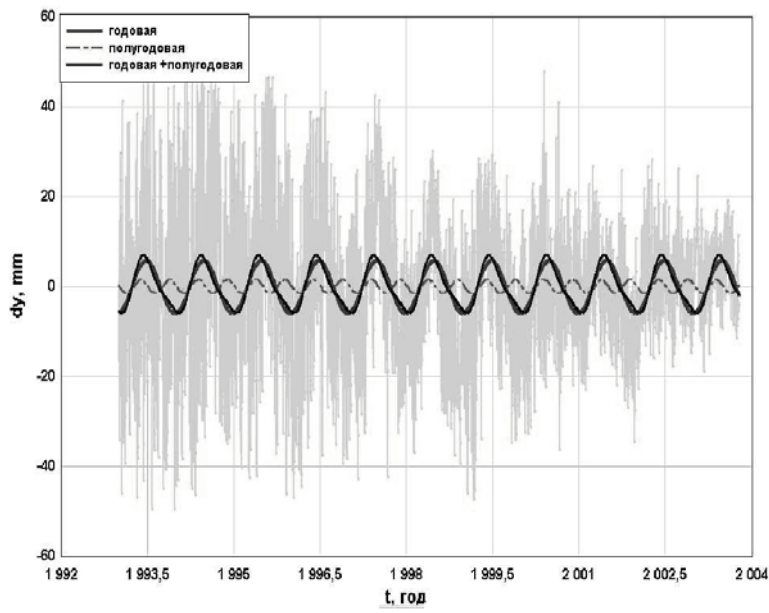
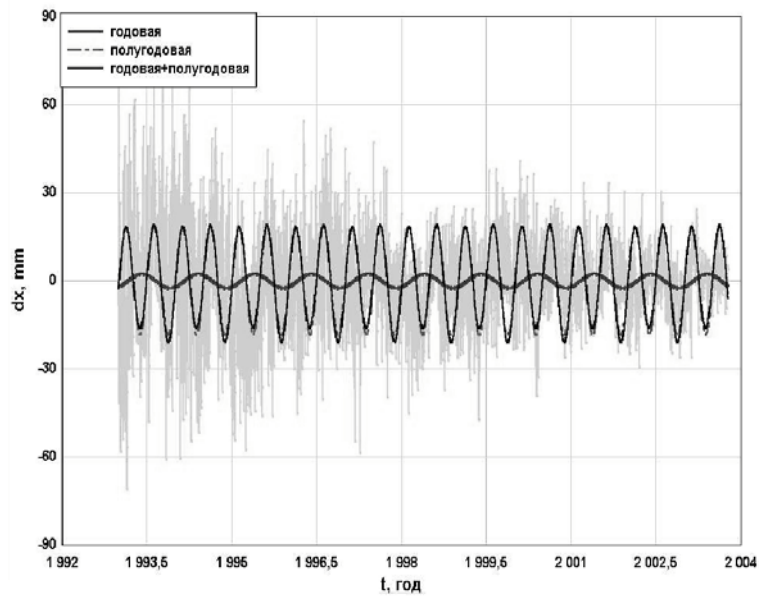


Рис. 2. Суточные вариации геоцентра в системе координат ITRF2000 (годовые, полугодовые, годовые+полугодовые)

Анализ изменений параметров орбит специальных геодинимических спутников, обращающихся вокруг Земли на разных высотах, дает возможность выявлять временные вариации гравитационного поля Земли различной периодичности и уточнять модели земного геоида. Выведенный на орбиту в марте 2002 г. научный комплекс GRACE, состоящий из двух спутников-близнецов, позволяет улучшить точность определения параметров гравитационного поля на несколько порядков особенно для гармоник высокого порядка. Два идентичных спутника обращаются на почти круговой околополярной орбите на высоте около 500 км, следуя друг за другом. Расстояние между ними, а также скорость удаления измеряются с помощью микроволновой (в К-диапазоне) линии связи с точностью лучше, чем $10 \mu\text{m}$ и $1 \mu\text{m}/\text{сек}$ соответственно. Оба спутника оснащены GPS (Black Jack) приемниками для измерений по системе высокый-низкий спутник и трехосным SuperSTAR акселерометром, который используется для определений негравитационных ускорений. Спутники также оснащены двумя звездными камерами для контроля взаимной ориентации. Точность акселерометра позволяет измерять линейные ускорения с частотой 10 Гц и точностью около 10^{-10} мсек⁻² в полосе от 4×10^{-2} до 5×10^{-5} Гц вдоль орбиты и в радиальном направлении. Данные, опубликованные по результатам обработки первых 110 дней работы комплекса GRACE [7], показывают, что построенная модель геоида EIGEN-GRACE02S определяется с ошибкой 1 см и с разрешением 275 км. Сравнения с наилучшими чисто «спутниковыми» моделями гравитационного поля и с наземными измерениями также подтверждают высокое качество полученной модели. (Рис.3) Впервые из прямых спутниковых определений удастся выявить гравитационные аномалии, присущие крупным тектоническим разломам, впадинам и зонам субдукций. До настоящего времени измерения таких аномалий проводились только на ограниченных территориях дорогостоящими наземными средствами и с использованием морских экспедиций. Анализируя вариации гравитационного поля совместно с другими геофизическими данными возможно изучать широкий спектр глобальных изменений, включая климат и динамику основных компонент планетной системы Земля (атмосферы, гидросферы, литосферы, мантии и ядра).

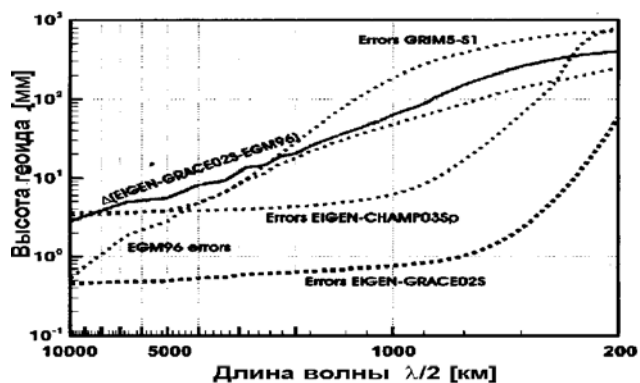


Рис. 3. Ошибки и различия амплитуд гармоник модели EIGEN-GRACE02S по отношению к другим спутниковым моделям геопотенциала (выражены в высотах геоида)

Как уже говорилось выше, важнейшим вкладом космической геодезии в глобальную тектонику стало подтверждение достоверности кинематических моделей движений литосферных плит, построенных по осредненным за миллионы лет геологическим данным и на основании численного моделирования конвекции в мантии. Определение и исследование скоростей движения стратегически выбранных точек земной поверхности с целью построения обобщенной динамической модели региональной и глобальной тектоники является одной из основных задач космической геодезии. (Рис 4,5)

В международных программах по этой проблеме участвуют практически все станции наблюдений ИСЗ (включая Российские), оснащенные современными измерительными средствами. На некоторых станциях одновременно ведутся измерения 2-3 различными инструментами, что дает возможность получать независимый контроль определяемых параметров. Глобальные спутниковые позиционные системы GPS и ГЛОНАСС являются наиболее эффективными для измерений всякого рода короткопериодических движений земной коры, в том числе для определения мест подготовки сильных землетрясений. До недавнего времени эти измерения, в основном, ограничивалось изучением изменений горизонтальных компонент координат станций, поскольку они определялись с более высокой (2-3 мм), по сравнению с вертикальной компонентой, точностью. Вертикальная компонента могла быть измерена с ошибкой не лучше 7-10мм. Сейчас положение изменилось в связи с регулярной работой сети постоянно-действующих станций сети международной GPS службы для геодинамики- (IGS), что позволило значительно уточнить модель орбитального движения спутников системы GPS. В результате в 2-3 раза повысилась точность определения и вертикальной составляющей координат станций. Основой международной службы является сеть станций наблюдений, состоящая из, примерно, 40 постоянно действующих основных станций и более 300 тоже постоянно действующих опорных станций. На территории России установлено 16 опорных станций глобальной сети Международной GPS службы для геодинамики и около 10 в странах СНГ (рис.6). В том числе, деформационная сеть NEDA из 8 постоянных станций Российской геофизической (сейсмической) службы РАН с 1997 г. обеспечивает непрерывные GPS наблюдения на огромном пространстве Северной Евразии [8]. Ежесуточный сбор данных измерений со всех этих станций полностью автоматизирован и выполняется с задержкой менее 1 часа. Данные GPS наблюдений с территории России позволили значительно улучшить реализацию опорной системы координат для Северной Евразии, так как они обеспечивают представитель-

ное покрытие самых крупных стабильных областей тектонической плиты, таких как Сибирский и Восточно-Европейский кранты

Кроме того, в составе международных глобальных сетей космической геодезии работают три российских лазерные дальномерные станции. Вводится в эксплуатацию геодезическая радиоинтерферометрическая сеть КВАЗАР (ИПА РАН), состоящая из трех 32-м антенн (Светлое, Зеленчукская, Бадары).

Результаты выполненного в Институте астрономии РАН анализа многолетних рядов измерений координат пунктов российского сегмента глобальной сети показывают, что помимо векового тектонического движения (порядка 1-3 см в год) наблюдаются также периодические изменения скорости движения станций. Период, близкий годовому, обнаруживается для всех трех компонент координат станций, но наибольшие амплитуды имеют вариации радиальной компоненты, за исключением станции в Якутске, где широтная составляющая скорости на протяжении 4-х лет колеблется с амплитудой 4-5 см. (Рис.7). Наблюдаются также сезонные квази-периодические вариации во всех трех компонентах с амплитудами 3-6 мм. Сравнение полученных результатов и существующих геофизических моделей дает основание полагать, что причиной сезонных вариаций может быть годовой эластичный отклик на вариации массовой нагрузки на поверхность Земли из-за изменений атмосферного давления, увлажнения почвы, ледников, непривливаемых волнений океанической поверхности. Все эти факторы, главным образом, влияют на вертикальную составляющую скорости движения наземного пункта. Сезонные изменения температурного режима вызывают колебания объема блоков земной коры, что также может отразиться в сезонных изменениях координат пунктов. Особенно интересные результаты получены с помощью спутниковых геодезических измерений для регионов, где усредненные тектонические модели не соответствуют реально-действующим современным деформациям. Главным образом, это границы плит, находящиеся под влиянием сжатия и междуплитовых столкновений, такие как Альпийский пояс, Памир - Тянь Шань, Тибет, или же области, подверженные тектоническому растяжению: Африканская рифтовая зона, запад США и др.

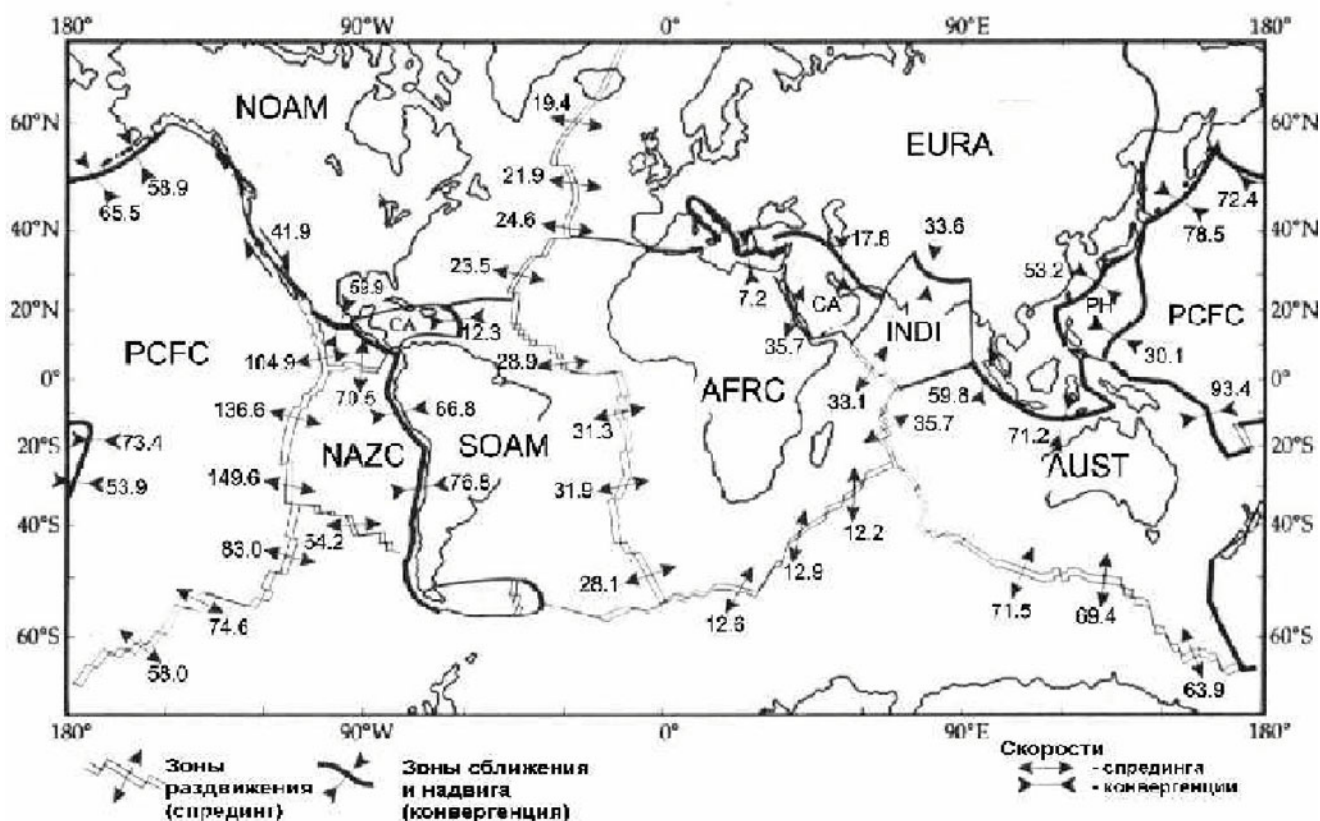


Рис. 4. Современные скорости движения земной коры вблизи границ литосферных плит

В северной части Центральной Азии с 1992 года действует сеть GPS-наблюдений, которая охватывает территорию Тянь-Шаня, Казахского щита, горных систем Джунгарии, Тарбагатай, юго-западной части Алтая. Работы ведет Научная станция ОИВТ РАН в Бишкеке совместно с американскими, киргизскими и узбекскими учеными [9]. По данным GPS измерений, выполненных в период с 1992 по настоящее время, примерно, на 800 пунктах сети определены вектора скоростей деформационных движений с ошибками около 2 мм в год по горизонтали и 4 мм в год по вертикали. На основании этих данных установлено, что общее сжатие поперек Киргизской части Тянь-Шаня происходит со скоростью 13 мм в год в долготной полосе 75-76 градусов. Важным ре-

зультатом, полученным по наблюдениям этой сети еще в 1994-1996 гг., является выявление особенно быстрого накопления напряжения (деформаций) вдоль восточного края бассейна Иссык-Куля, где перепады скоростей достигали 7 мм/год на расстояниях менее 20 км. Аналогичные перепады скорости отмечались в районе бассейна Вентура в южной Калифорнии перед сильным землетрясением в Нортридже и могут рассматриваться как предвестник грядущего землетрясения.

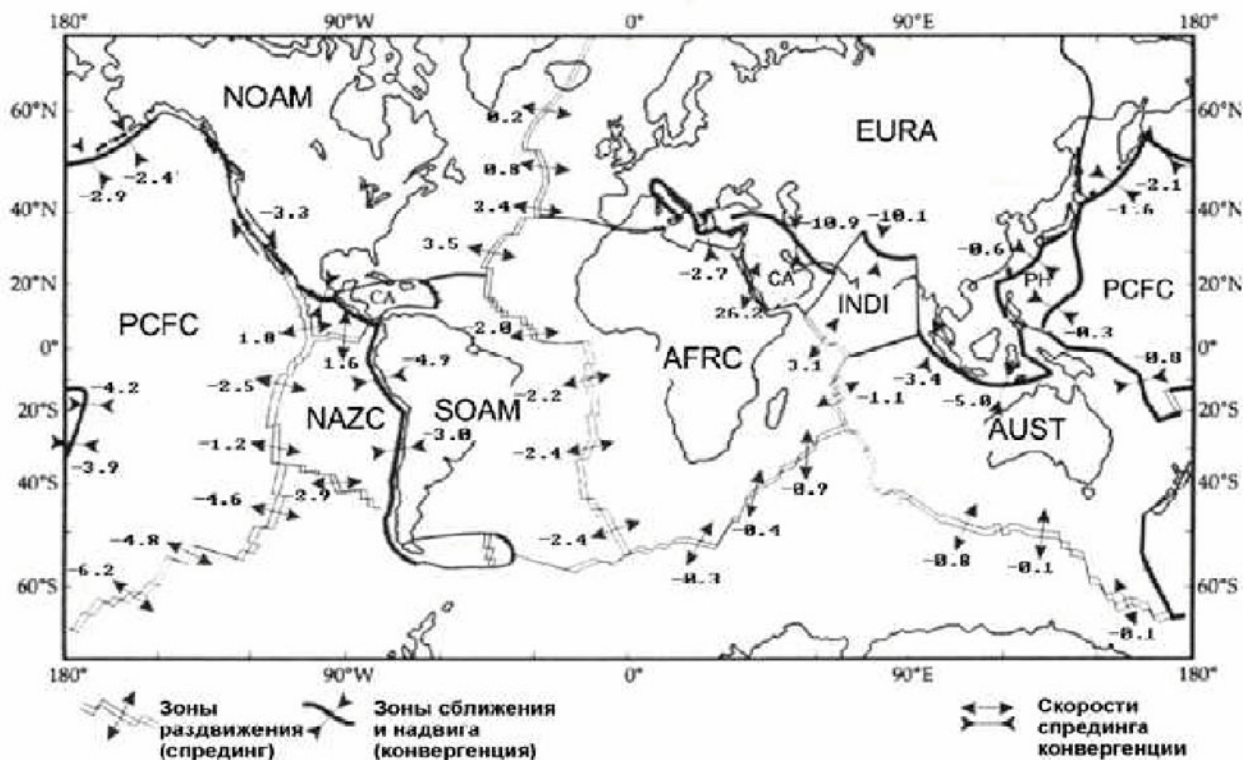


Рис. 5. Разности скоростей движения земной коры вблизи границ литосферных плит по современным и историческим данным

Сеть Международной службы GPS для геодинамики

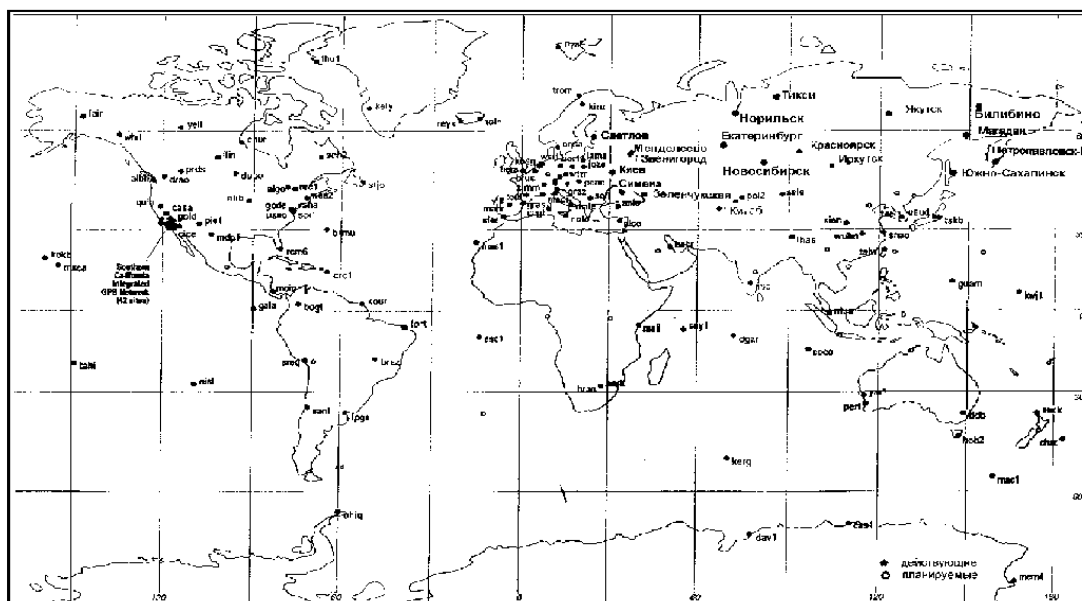


Рис. 6. Сеть станций GPS

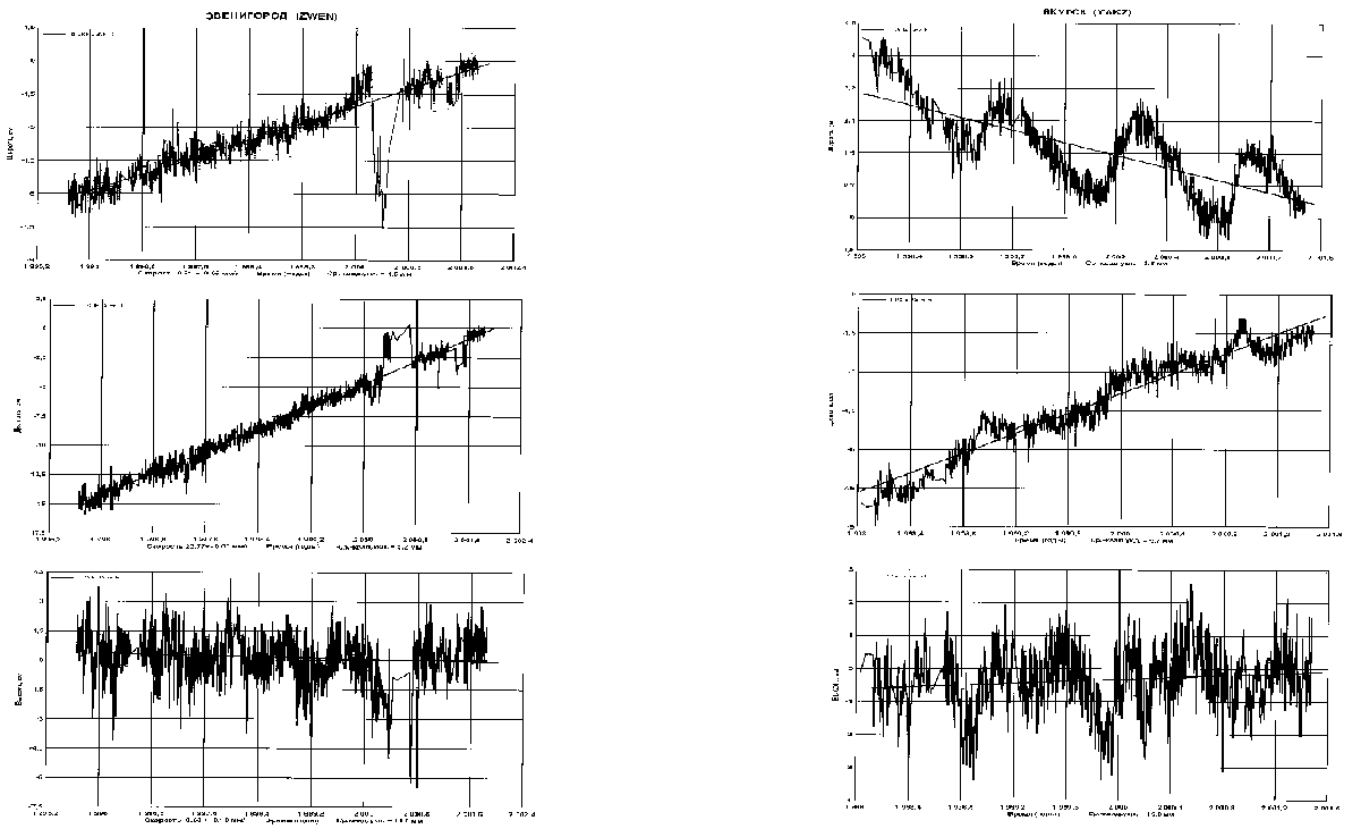


Рис. 7. Графики изменений координат станций Звенигорода и Якутска, определенные по GPS измерениям

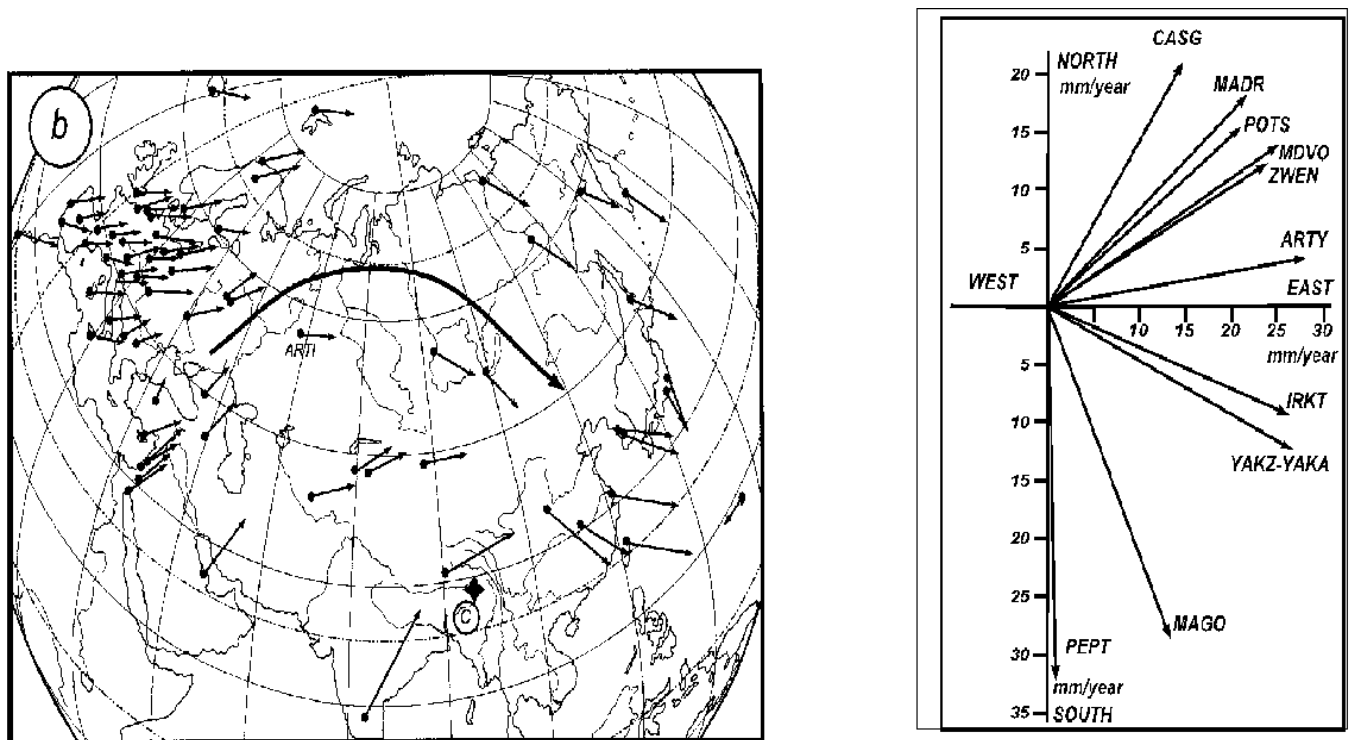


Рис. 8а. Гипотетическое представление о вращении континента

Рис. 8б. Направления современных движений GPS станций в северной части Евразии

Выполненные исследования деформационных процессов Азии уже привели к пересмотру кинематической модели пространственной и временной эволюции региона. Для создания и уточнения новых моделей требуются дополнительные и продолжительные GPS измерения на всей территории Юго-Восточной Азии, включая Китай, Монголию и острова Курильской гряды.

Построенная в Уральском институте геофизики РАН на основании данных глобальной GPS сети карта векторов движения основных блоков Евро-Азиатского континента [10] показывает, что генеральным направлением движения Европейской части континента является северо-восточное (рис. 8а,б). Однако по

мере продвижения расположения станций на восток северная составляющая движения уменьшается и приближается к долготе Новосибирска направление движения изменяется на южное. Движение крайних точек континента (Магадан, Петропавловск – Камчатский) имеет явно выраженное юго-западное направление, то есть наблюдается вращение Евро-Азиатского континента вокруг точки, расположенной в пределах горного массива Гималаи-Тибет. Как утверждают специалисты Государственного Геологического музея РАН им. Вернадского [11], характер изменения значений и направлений скоростей движений GPS станций свидетельствует о том, что Евро-Азиатский континент не является монолитным тектоническим блоком, а состоит из твердой Северо-Евразийской плиты, окруженной вдоль юго-восточной и восточной границы зоной, состоящей из нескольких десятков микроплит. Движение этих малых блоков не всегда может быть описано моделью движения абсолютно твердого тела по сфере. Взаимодействие с соседними плитами и блоками влияет на распределение сейсмических напряжений во внутренних частях континента, что подтверждается наибольшей сейсмической активностью в треугольнике, ограниченном гималайскими надвижками, разломами Памира-Байкала и Северо-Восточного Китая.

Для более эффективного научного использования данных, предоставляемых космической геодезией, необходимы объединенные усилия всех заинтересованных ведомств и институтов РАН по расширению сети наблюдательных станций, особенно в регионах с повышенной геодинимической активностью. В этой связи важно отметить, что Федеральная служба геодезии и картографии при участии ряда институтов Российской академии наук и других ведомств начала работы по построению Фундаментальной астрогеодезической сети (ФАГС) с использованием, главным образом, GPS измерений. Эта сеть будет состоять из, примерно, 40 опорных пунктов, удаленных на 700-800 км друг от друга; некоторые из них (около 15) будут работать непрерывно, как основные опорные станции. Опорные пункты ФАГС должны обеспечить определение абсолютных значений геоцентрических координат с точностью 5 см и относительных координат с точностью 1 см (в плане) и 2 см (по высоте). Предполагается, по возможности, их совместить с существующими на территории России пунктами международных сетей IGS/GPS, DORIS, SLR и КВАЗАР/РСД, что значительно повысит точность самой ФАГС и позволит использовать данные измерений этих пунктов в научных исследованиях. Разработанный в ЦНИИГАИК принцип построения опорной сети, состоящий в сочетании GPS/ГЛОНАСС и наземных гравиметрических измерений, отвечает требованиям геодинимических задач, поскольку определение подвижек земной коры и изменений уровня моря может проводиться на разных континентах в единой высотной системе.[12]

В заключение хотелось бы особенно подчеркнуть, что благодаря замечательным возможностям измерительных средств космической геодезии (как по точности, так и по разрешению) и достижениям в научной интерпретации полученных данных перед геофизиками и геологами открылись новые перспективы для моделирования различных геофизических процессов и их временной эволюции. Новые космические проекты, такие как GOCE, JASON, CHAMP, GRACE и др. предназначенные для дальнейшего уточнения статических и коротко-периодических компонент гравитационного поля и циркуляции океана в совокупности с данными сейсмической томографии, поверхностных деформаций и вариаций угловой скорости Земли, должны дать новые уникальные данные для понимания структуры Земли, механизмов тектонических процессов и причин изменений уровня мирового океана. Все это подтверждает необходимость обобщенного подхода к изучению динамики и физики Земли, как интегрированной системы.

Литература

1. *J.Ray, ed.* IERS Analysis campaign to investigate motions of the Geocenter.// IERS Technical Note, 25, Observatoire de Paris, April 1999, France.
2. *Webb, F. H., J. F. Zumberge.* An introduction to GIPSY/OASIS-II, JPL Internal Document D-11088, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1997, USA.
3. *Kuzin S.P., Tatevian. S.K.* DORIS data analysis at the Institute of Astronomy, RAS, Proceedings of "DORIS DAYS", 1-3 may, 2000, Toulouse, France.
4. *Кузин С.П., Татевиан С.К.* Обработка и анализ ДОРИС измерений за период 1999- 2001г, Сборник трудов семинара «APSG-Иркутск, 2002», М., ГЕОС, 2002, стр.54- 66.
5. *Татевиан С.К. Кузин С.П., Ораевская С.П.* Использование спутниковых позиционных систем для геодинимических исследований. Геодезия и картография, N 6, 2004, Картцентр-Геодезиздат, Москва, 33-44.
6. *Tatevian S.K., Kuzin S.P.,Kaftan V.I.* Comparison of Geocenter Variations, derived from 10 years of GPS, DORIS and SLR Data. Proceedings of the AOGS IWG3 Assembly, Singapore, 5-9 July, 2004.(in print).
7. *Reigber Christoph, Roland Schmidt, Frank Flechtner and oth.* An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S. Journal of Geodynamics, 2005, 39, 1-10.
8. *Стеблов Г.М., Старовойт О.Е.* Северо-евразийская деформационная GPS сеть (NEDA), Сборник трудов семинара «APSG-Иркутск, 2002», М., ГЕОС, 2002, стр.85-96.
9. *Herring T.A., Hager B.H., Meade B., Zubovich A.V.* Contemporary horizontal and vertical deformation in the Tien Shan”, Сборник трудов семинара «APSG-Иркутск, 2002», М., ГЕОС, 2002, 75-84.

10. *Уткин В.И.*, О наследовании движения Евро-Азиатского континента, Сборник трудов семинара «APSG-Иркутск, 2002», М., ГЕОС, 2002, 15-20.
11. *Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Ряховский В.М.*, Блоки Евразии: использование результатов спутниковых измерений для корректировки геодинамических построений, Сборник трудов семинара «APSG-Иркутск, 2002», М., ГЕОС, 2002, 21-31.
12. *Demianov G.V., Tatevian S.K.*, Integrated geodynamical network in Russia. (Scientific objectives and realization). *Phys.Chem.Earth*. Vol.25 N 12, 2000, 819-822.