

Е. Н. НУСИПОВ<sup>1</sup>, Ю. Г. ЩЕРБА<sup>2</sup>

## PS-ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ – ОСНОВА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ (ЦЕНТРАЛЬНОАЗИАТСКИЙ РЕГИОН)

Кер бетінің қазіргі кездегі қозғалыстарын геодинамикалық бақылау арқылы зерттегенде, іргелі және колданбалы ми нәтижелер алудың негізі – нүктелердің координаттарын өте жоғары дәлдікпен анықтайтын әдістемелердің ы. Біраз әдістемелер Орталық Азия мен Солтүстік Тянь-Шаньды GPS – өлшемдерімен өте жоғары дәлдікпен зілген зерттеулер кезінде аныкталды. Жер койнауының геодинамикалық жағдайын бағалаудың негізгі ақпарат – жылдамдық компоненттерінің өрістері мен сыйымдалу құбылысының дамуын көрсететін карталар. Карталар әдістемелерді қолдану арқылы жасалған.

Методические приемы высокоточных определений координат точек земной поверхности составляют основу фундаментальных и прикладных результатов мониторинга геодинамического состояния контролируемых территорий. Элементы методики отработаны в ходе экспериментальных высокоточных GPS-измерений в Центральной Азии и на Северном Тянь-Шане. В дополнение к данным первичной обработки в виде 3-х взаимно ортогональных компонент скорости движения объектов предлагается использовать набор карт скорости различного вида деформационных процессов, рассчитанных по оригинальной методике. Поля компонент скорости и карты хода деформационных процессов составляют основу оценки геодинамического состояния региона.

The methodical receptions of precision definitions of coordinates of points of a terrestrial surface make a basis of fundamental applied results of monitoring of a geodynamic status of controllable territories. The elements of a technique are fulfilled during experimental precision GPS-measurements in Central Asia and on Northern to the data of primary processing as 3 mutually orthogonal components of speed of movement of items it is offered to use a set of maps of speed of a various kind deformation of objects designed on an original technique. Fields a component of speed and the maps of a course deformation of processes make up a basis of a rating of a geodynamic status of region.

Представления об основных элементах методики высокоточных GPS-измерений координат земной поверхности и возможностях этой технологии необходимы специалистам, занимающимся как фундаментальными, так и прикладными аспектами применения метода. Это создание доверие к технологии и помогает осознанному представлению о реальных возможностях технологии в настоящее время и в перспективе. Являясь принципиально новым методом в области гравиметрии и геодезии, технология GPS, как это обычно бывает, позволила на принципиально новом уровне подойти к решению многих вопросов современной геодинамики. Главным образом, это связано с открывшейся возможностью в масштабе порядка и для больших территорий буквально видеть современные микродвижения земной

поверхности, которые во многом обусловлены процессами в литосфере. К сожалению, методические аспекты этого уникального применения технологии GPS не имеют единой четкой сосредоточенности и разбросаны в многочисленных публикациях, часто в неполном виде или носят узкоспециальное профессиональное представление. Близкой по возможностям и многим параметрам к GPS является одновременно созданная советская спутниковая система позиционирования ГЛОНАСС. Главным отличием является близкие по значению, но различающиеся несущие частоты и применение в ГЛОНАСС частотного разделения сигналов спутников для их идентификации. В системе GPS используется разделение сигналов по специальным кодам. В настоящее время, разрушенная в годы перестройки

<sup>1</sup> Казахстан, 050060, г.Алматы, пр. аль-Фараби, 75а, Институт сейсмологии МОН РК.

ки система ГЛОНАСС восстанавливается. Обе системы имеют близкие по высоте почти круговые орбиты спутников и содержат по 24 одновременно работающих спутников с равномерным их размещением на орбитах. В системе ГЛОНАСС на трех орбитах с углом к плоскости экватора –  $64^{\circ}$  размещается по 8 спутников. Система GPS включает 6 орбит и по 4 спутника на каждой, угол наклона орбит к плоскости экватора –  $55^{\circ}$ . Высоты орбит над поверхностью Земли составляют в среднем 20145 км для системы GPS и 19 100 км для ГЛОНАСС [9–12]. В основе возможности применения технологии GPS для изучения современных движений тектонической природы, достаточно медленных, от единиц до не более десятков миллиметров в год, лежит весьма высокая инструментальная точность измерения реального времени пробега сигналов в системе спутники – приемники, а также выдержанность параметров движения тектонической природы в течении достаточно длительного времени (возможно годы или даже более длительные интервалы времени), не считая стрессовых дислокаций, например, в результате сильных сейсмических процессов, оползней и т.п. Инструментальные погрешности самой системы настолько малы, что они с избытком обеспечивают практически все потребности в точности, возникающие при решении типовых проблем геодинамики. Основная проблема погрешностей заключается в том, что реальные пути распространения сигналов от спутников системы к приемникам (а следовательно и время прохождения) сильно зависят от состояния среды в промежутке между спутниками и приемниками (ионосфера и тропосфера), а также от условий приема сигналов в точке стояния приемника. Собственно оптимизация и выделение сигналов на этапе их регистрации в полевых условиях во многом учтены заложенными алгоритмами специальной обработки сигналов, практически не зависящей от пользователя. Непосредственно пользователю остается лишь неукоснительно соблюдать некоторые простейшие приемы ведения измерений в полевых условиях. Частично поправки на стадии обработки учитываются на основе известных закономерностей в распространении радиосигналов различных частот от концентрации заряженных частиц (электронов) в ионосфере, а также путем разработки моделей распространения в тропосфере

для различных регионов. Алгоритмически учитываются поправки за вращение Земли и нестабильность его, положения оси, приливные процессы и некоторые другие. Отметим, что наземными службами вводятся поправки за релятивистские эффекты (спутники движутся со скоростями около 3 км/с, соответственно часы в системе спутников отстают от хода часов приемников в соответствии с положениями теории относительности), поправки за действие давления корпускулярного и светового излучения солнца, за реактивные процессы, возникающие в результате истечения микро масс веществ с поверхности спутников и за неоднородности гравитационного поля Земли, значительно ослабленные на высотах орбит. Теоретическая сторона спутниковых навигационных систем широко освещена в многочисленных публикациях для разного уровня подготовки пользователей [10,11,12]. Вопросы инструментального обеспечения пользовательских систем GPS достаточно разработаны, выпускаются многие модели приемных устройств с развитым сервисным обеспечением. Все они, независимо от назначения, достаточно просты в эксплуатации и доступны широкому кругу пользователей. Важно отметить, что надежность высоких метрологических показателей системы гарантируется развитыми наземными службами контроля, сопровождения и коррекций. Эти мероприятия производятся по специальной технологии и практически не затрагивают интересов пользователей [1]. В случае появления каких либо форс мажорных нарушений в системе, ее реабилитация производится так, что все необходимое для пользователя учитывается путем внесения соответствующих изменений в непрерывно посыпанную для приемников пользователей специальную информацию. Нестандартное использование системы GPS для обнаружения и изучения тектонических процессов, выражющихся в проявлении современных движений поверхности Земли с весьма малыми скоростями (максимум около 100 мм/год, а в среднем существенно меньших), потребовало разработки некоторых довольно простых дополнительных приемов работ. Особенно это коснулось использования метода при невозможности вести регистрацию сигналов единовременно во всех точках сети и использования временных (не охраняемых) пунктов регистрации. В Центральноазиатском

регионе основы этой методики были разработаны специалистами НС ИВТ РАН (в г. Бишкеке) с участием специалистов Массачусетского Технологического института США еще в период 1992-1995 гг. (А. В. Зубович и др.). Она успешно применяется и в настоящее время. Значительный многолетний опыт работ в Центральноазиатском регионе и, в частности, на Северном Тянь-Шане, творческих коллективов НС ИВТ РАН (в г. Бишкеке), Института сейсмологии МОН РК и Сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) того же министерства, позволяет достаточно обоснованно считать, что эта методика наиболее рациональная в условиях отсутствия достаточного количества приемной аппаратуры и значительными затратами при строительстве перманентных пунктов [2, 3]. Для наблюдений на значительной территории наиболее эффективной и приемлемой оказывается использование временных пунктов. От постоянных они отличаются тем, что имеют минимум оборудования, закладываются в грунте посредством надежно фиксируемого репера стандартной конструкции, снабжены посадочным узлом, который обеспечивает идентичную ориентированную установку стандартных антенн посредством стандартного переходного штока. Вне рабочего состояния пункт маскируется (грунтом и др. подручными материалами), чем надежно защищается от воздействия посторонних лиц. Сохраняясь временные пункты могут многие годы, что обеспечивает проведение измерений на них многократно с любыми перерывами. Единственный крупный недостаток такой методики работы на пунктах связан только лишь с тем, что при ограниченном числе комплектов приемной аппаратуры наблюдения по сети производятся не одновременно, т.е. в условиях различного состояния влияющих факторов. Из-за этого возникает и проблема изучения быстро переменных вариаций. Кроме того, по понятным причинам возникают неудобства при ведении измерений длительное время на таком пункте. Таким образом, использованная методика в основном рассчитана на изучение поля скоростей и его производных, сохраняющихся достаточно длительное время, но возможно имеющее различия по территории исследований. Этим свойством характеризуется составляющая современных движений, обусловленная тектоническими причинами как

мантийно-корового, так и общепланетарного происхождения.

Для достижения наибольшей точности координат при решении геодинамических вопросов практически всегда применяют варианты дифференциальных измерений (т.е. с использованием базовой сети или отдельных пунктов приема с надежно известными координатами) и фазовый метод измерений, при котором определяется разница фаз несущих частот сигналов спутников с последующим определением целой части длин волн от приемника до спутников. Эти приемы являются типовыми и используются при точных геодезических измерениях.

Важным при высокоточных измерениях является регламент их проведения. В отличие от сетей с перманентными пунктами, на временных пунктах полевые измерения проводят сессиями, в пределах которых выполняются многократно независимые акты регистрации сигналов на каждом пункте. Это позволяет при последующей статистической обработке ослабить влияние многочисленных помех, не связанных с тектоническими процессами и имеющими характер случайных величин. Для ослабления высокочастотных помех (они создаются в основном флуктуационными процессами во всей толще атмосферы), по опыту работ, регистрацию проводят не менее 2-х раз в минуту. Общая продолжительность регистрации выбирается обычно кратной целому числу периодов обращения спутников. Он составляет примерно 12 часов. В результате специфические помехи за счет положения спутников на небесной сфере также при обработке ослабляются. При работах в Центральноазиатском регионе пункты региональной сети отрабатываются в течение 36 часов одновременно несколькими приемниками, размещаемыми в разных пунктах с последующим переездом по согласованному графику. Отметим, что при геодезических работах длительность работы на одном пункте обычно составляет 15-20 минут. Этого оказывается в большинстве достаточным для достижения требуемой в геодезии точности определения координат. По окончании сессии полевых наблюдений, когда отработано запланированное число пунктов, все данные поступают в центр обработки. Рассмотренная схема полевых измерений обусловлена невозможностью в настоящее время вести одновременные измерения на всей

сети из-за отсутствия средств на аппаратуру и оборудование, что и приводит к необходимости использовать временно отрабатываемые пункты простейшей конструкции, не охраняемые, с последующими перемещениями приемников на очередные идентичные пункты. Принятая схема существенно уступает измерениям на перманентной сети по оперативности получения конечной информации и соотношению сигнал/помеха в конечных данных, но неизмеримо дешевле и позволяет обходиться всего лишь несколькими комплектами приемной аппаратуры. Более чем десятилетний опыт работы показал, что для изучения стационарной компоненты движений вне скачковых изменениях координат пунктов (например, в результате крупных сейсмических событий) допустимо и необходимо статистическое осреднение результатов по каждому из пунктов за несколько лет. Установлено (А.В Зубович 2001 г.) что при этом среднеквадратическая погрешность определения компонент скорости может составлять не более 1-2 мм/год. Одновременно с рядовыми наблюдениями на временных пунктах проводятся наблюдения на нескольких перманентных станциях, а для первичной обработки данных используют и мировую сеть станций сервисной службы IGS. Синхронизация наблюдений всех одновременно работающих станций осуществляется единым временем, вводимым однообразно во все приемники независимо от их числа и независимо от пользователей.

Самостоятельный ответственный этап высокоточных определений координат точек для оценки скоростей современных движений включает первичную обработку данных полевых регистраций сигналов спутников. Задачами первичной обработки являются приведение результатов регистрации спутниковых сигналов к единой базе данных, получение необходимых сведений о состоянии системы GPS на момент полевых наблюдений из служб наземной сети управления, расчеты и введение необходимых поправок, и вычисление координат пунктов сети GPS. Обычно первичная обработка производится по окончании сессий полевых измерений и называется постобработкой. Для обработки используется хорошо апробированный комплекс программ GAMIT/GLOBK, разработанный в Массачусетском Технологическом Институте США. Вся первичная обработка данных GPS, полученных на террито-

рии Центральноазиатского региона, проведена ранее и выполняется в настоящее время специалистами НС ИВТ РАН. Процесс работы с программным комплексом содержит несколько этапов, которые здесь не рассматриваются. Главным является то, что как и полевые измерения, первичная обработка это – совершенно самостоятельный этап, требующий довольно больших затрат времени в основном на подготовку баз данных для основного счета. Комплекс работает в LINUXe. Известно еще несколько комплексов аналогичного назначения, например, BERNSE (разработка швейцарских специалистов). Конечные результаты по сессиям обычно получают к концу каждого года проведения полевых сессий. В результате первичной обработки данных одной сессии измерений получают координаты пунктов в геоцентрической системе координат (WGS84 или в системе ITRF, введенной сервисной мировой службой IGS и опирающейся на точно известные координаты примерно 50 станций этой службы, располагающихся в относительно стабильных по характеру современных движений регионах Земли с учетом смещений этих пунктов на каждую эпоху). Координаты могут быть пересчитаны в любую другую систему, используемую на данной территории. Скорости движения пунктов вычисляют путем сравнения координат пунктов для разных сессий и обычно их приводят к размерности [мм/год]. Объединенные специальным образом данные о скорости разных сессий представляют некоторое осредненное значение для конкретного пункта. В этом значении в виде составляющих можно выделить глобальную, региональную и другие составляющие, которые складываются по правилам векторного суммирования и в совокупности определяют абсолютное движение пункта с исключением вращения Земли, движения полюсов и приливных воздействий. Глобальная составляющая характеризует движение континента в целом и на ее фоне не просматриваются обычно меньшие по величине региональные и другие составляющие. Поэтому выполняются процедуры исключения региональной составляющей, а остаточное значение рассматривают как информативное для региона. На этапе первичной обработки вводится ряд поправок за некоторые сторонние процессы (ионосфера, тропосфера и некоторые другие). Исключить полностью помехи

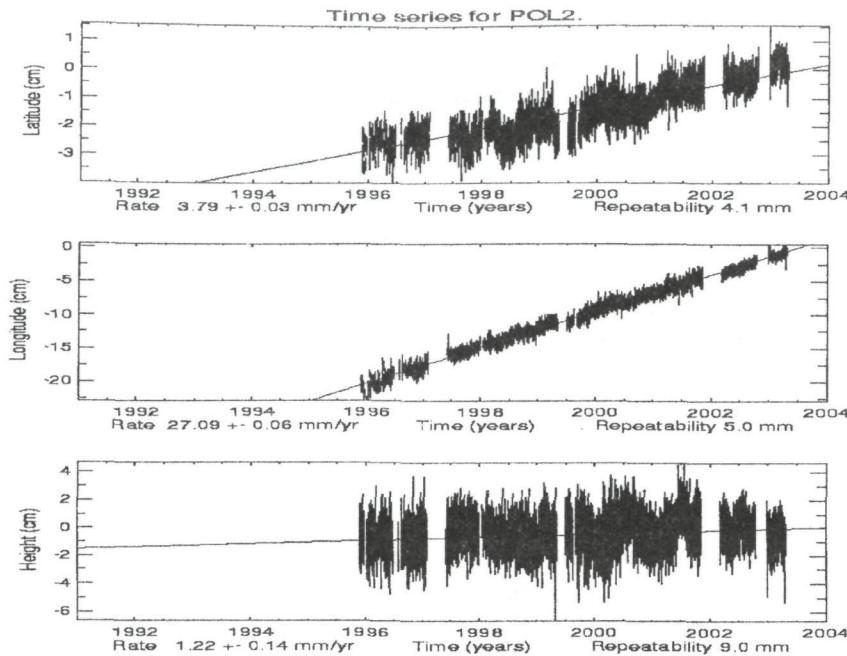


Рис.1 Фрагменты временных рядов приращений координат пункта POL2, входящего в международную сеть станций IGS на территории Кыргызской Республики (территория НС ИВТ РАН, в г. Бишкеке), происходящих в результате совместного действия различных мешающих факторов и тектонических процессов. На верхнем графике – компонента, направленная по широте, в середине – компонента по долготе, на нижнем – вертикальная компонента.

(Данные сервисной службы IGS)

невозможно, поэтому во временных рядах координат всегда присутствуют ошибки. Примером их влияния является запись приращений координат для одного из пунктов мировой сети – POL2 (рис.1), расположенного на территории НС РАН (г. Бишкек). Данные этого перманентного пункта используются совместно с другими аналогичного назначения пунктами для обработки всей Центральноазиатской сети GPS. Как видно из рисунка 1, координаты пункта претерпевают непрерывную флюктуацию при закономерно отмечаемом трендовом их изменении. Здесь помимо высокочастотных (суточных) вариаций, хорошо видна и годовая помеха, наиболее четко прослеживаемая на компоненте по широте и на вертикальной компоненте (верхний и нижний графики).

Из приведенного примера также следует, что необходимым является исключение или предельно возможное ослабление любых перемещений пункта относительно среды, а также и среды в ближней окрестности пункта. Поэтому обычно пункты устанавливают в скальных ненарушенных породах или принимают специальные меры в случае рыхлых грунтов. Избегают размещать пункты на склонах, особенно если велика веро-

ятность смещения верхнего слоя. В развитых странах идут и на выполнение весьма жестких требований к условиям установки. В Японии, по всей территории страны, со средним расстоянием между пунктами до 25 км, создана сеть постоянных, однотипных пунктов-обелисков с размещенными в них приемной антенной, приемником, оборудованием для спутниковой связи с центрами обработки принятых данных. В настоящее время таких пунктов по территории Японии порядка 1000. Аналогичные сети известны в Италии (до 800 пунктов), других европейских странах, США. Довольно значительное количество пунктов постоянной регистрации построено в КНР. В Японии обелиск для стационарных наблюдений GPS по разным источникам в среднем стоит несколько более 100 тыс. долл. США, но при этом обеспечена возможность проведения практически непрерывных измерений одновременно по всей исследуемой территории при весьма незначительных затратах на эксплуатацию таких сетей. Непрерывно работающая сеть пунктов GPS существенно расширяет область применения технологии, в том числе, для изучения и мониторинга слоев атмосферы в метеорологии и

других областях. Этот опыт важен в перспективе развития экспериментальных высокоточных наблюдений в Республике Казахстан, имеющей значительную территорию.

Наряду с помехами в виде собственных движений пункта не тектонической природы, существует довольно значительная группа помех, обусловленных условиями прохождения сигналов от спутника через ионосферу и тропосферу, а также специфические помехи, в результате рассеяния сигналов на близко расположенных предметах от приемной антенны. В числе таких могут быть деревья, строения и даже животные и люди, находящиеся у пункта в процессе работы приемника. Именно это и определяет выбор условий измерения при установке пункта. Нежелательное воздействие могут оказывать различные источники радиоизлучения вблизи рабочих длин волн системы GPS (19 см и порядка 24 см). Меняющаяся непрерывно конфигурация созвездия спутников в процессе их движения, изменение связанных с этим условий распространения сигналов в ионосфере и тропосфере и подходов радиоизлучений к близко расположенным к приемной антенне рассеивающим предметам, влияют на структуру принимаемого сигнала и в целом формирует неизбежные погрешности в определении координат пункта. Атмосферные погрешности существенно возрастают при приеме сигналов от спутников, находящихся низко над горизонтом. Поэтому из наблюдений исключают сигналы спутников, находящихся ниже  $15^{\circ}$  над горизонтом, для которых алгоритмы поправок за атмосферные условия некорректны из-за протяженных путей распространения в неоднородных толщах атмосферы. При магнитных бурях, создающих неоднородности в ионосфере, высокоточные измерения не проводят или исключают эти данные в процессе первичной обработки.

Информативная ценность данных GPS-измерений зависит также от геометрических свойств сетей наблюдения. В самом общем виде требования к сетям во многом аналогичны требованиям к сетям геодезических съемок на площади. Различие связано лишь с тем, что объектом изучения являются вероятные неоднородности поля современных движений, а в геодезии – размеры характерных форм рельефа местности. Так как многие виды съемок имеют принципиально

дискретный характер, их объединяет единый подход к параметрам сетей. В теоретическом плане вопрос полностью аналогичен задаче о дискретном представлении непрерывных функций с ограниченной верхней частотой спектра, которая и обуславливает густоту точек согласно известной теореме отсчетов. При наблюдениях на поверхности играют роль пространственные частоты ожидаемых неоднородностей поля. Для минимизации погрешностей дискретного представления непрерывной функции необходимо иметь (в соответствии с известной теоремой отсчетов) не менее 2-х или более отсчетов (измерений) изучаемого поля в пределах характерных размеров его минимального экстремума на изучаемой площади. К этому также добавляется и практическая осуществимость (экономическая целесообразность), так как излишняя сгущенность сети мало влияет на увеличение информативности, но существенно оказывается на затратах. Если не требуется детальное описание форм неоднородностей изучаемого поля движений, то сеть может быть предельно упрощена. В случае вытянутых объектов (зоны разрывных нарушений) сеть сосредотачивают в ближней окрестности центральной части со сгущением пунктов к осевой линии объекта. Или организуют пересечение такой неоднородности несколькими профилями пунктов, так, чтобы в контур неоднородности поля попало не менее 1-2 пунктов [4–8]. Детальность региональных сетей может быть самой различной. Площадные сети могут носить и рекогносцировочный характер, когда необходимо установить различия в движениях крупных структур или блоков земной коры. Такие сети не дают возможности получить информацию для более глубокого анализа геодинамической ситуации, но рекогносцировочные работы полезны на начальном этапе развития сети, который может занимать несколько лет. Опыт показывает, что для мониторинга объектов в масштабах мощности коры сеть должна быть не реже, чем мощность коры или более сгущенная. Во всех случаях желательно обеспечить и равномерность распределения пунктов. Таким образом, сети региональных наблюдений могут быть по своим параметрам весьма разнообразными. Практически достаточным может считаться расстояние от первых километров до первых десятков километров в зависимости

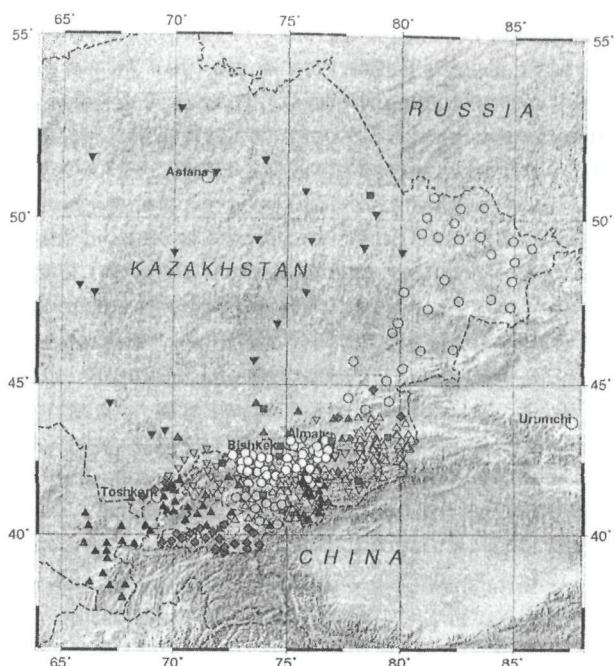
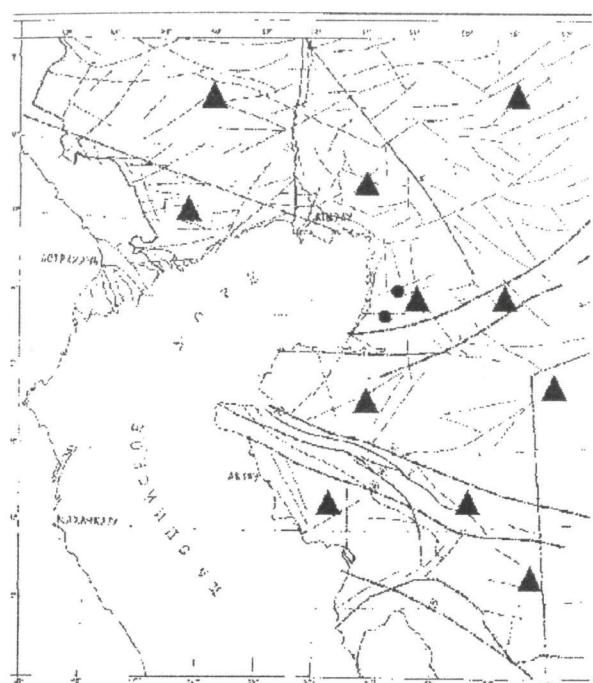


Рис. 2. Региональная сеть пунктов GPS-измерений на территории Центральноазиатского региона. Различные обозначения относятся к пунктам, заложенным в разные годы по мере последовательного формирования сети. Наиболее сгущенная сеть на территории Северного Тянь-Шаня (по публикациям А.В. Зубовича)

от конкретной задачи и обширности деформационного процесса на изучаемой территории. Сети GPS-измерений обычно подразделяются на региональные и локальные (рис. 4), различающиеся только лишь характерными размерами изучаемых территорий. Примером региональной сети является Центральноазиатская сеть GPS, закладка которой была начата в 1992-1993 гг., продолжается и в настоящее время путем последовательного наращивания числа пунктов (рис. 2). Как показано на рисунке, наибольшую плотность сеть



имеет в пределах известных сейсмоактивных регионов Северного Тянь-Шаня. Предполагается, что дальнейшее развитие сети будет идти и с выходом на новые площади, привлечением данных из соседних регионов (в частности, с приграничных территорий КНР в рамках соглашений о сотрудничестве), а также за счет сгущения сети в районах, где измерения начаты ранее.

В качестве простейшей сети нами предлагается сеть в виде пунктов измерения, расположенных в вершинах произвольного треугольника



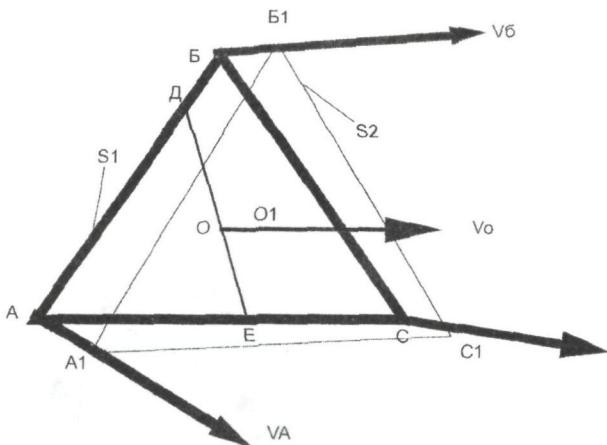


Рис. 5. Простейшая сеть GPS-измерений – площадка в виде треугольника с пунктами измерений в вершинах площадки и векторами горизонтальных составляющих скорости. В сильно увеличенном виде, тонкой линией показано смещение ячейки сети за счет современных движений. В геометрическом центре ячейки показан вектор скорости, найденный в результате линейной интерполяции скоростей движения вершин ячейки в предположении допустимости этой процедуры. Ячейка позволяет произвести приближенное количественное определение основных видов деформирования, в том числе, зависящих от азимутального направления. Может быть использована как элемент простейшего мониторинга на локальном объекте

(рис.5). Если предположить, что в ближайшей окрестности такой ячейки допустимо интерполирование и экстраполирование значений ортогональных компонент скорости пунктов, например, по линейным законам, то возможно вычисление и скоростей различного вида деформационных проявлений, в том числе, зависящих от азимутального направления. Для наглядности процесс скорости линейного относительного деформирования может быть изображен в виде плоской фигуры-розы на каждый из требуемых последовательных моментов времени. Это позволит выявить ход или тенденцию деформационных процессов, в том числе и критических. Во многих случаях при мониторинге на ограниченных по площади объектах, простейшая сеть может заменить сложную дорогостоящую сеть из многих пунктов. Сеть пунктов в виде треугольной ячейки может выполнять и индикаторную роль, если обосновать критерии опасного развития деформационного процесса. В локальных сетях желательно иметь пункты, вынесенные за пределы ожидаемой аномальной зоны движений, что позволит более четко определить границы зоны. На

локальных сетях, развитых у гг.Бишкек и Алматы, измерения проводятся чаще, чем на региональной, частью которой они одновременно являются, обычно до 4-6 раз в год при 1 измерении в 1-2 года на пунктах региональной сети

Интерпретация полей скоростей современных движений может быть наиболее успешной, если известна их структура на изучаемой территории. По этой причине нами в свое время были предприняты усилия для количественных оценок этих свойств современных движений. В теории идеально упругих сплошных изотропных сред, известны аналитические выражения связи полей смещений и компонент тензора упругих деформаций. Переходя от полей смещений деформируемой однородной изотропной среды к полям ортогональных компонент скоростей движения, после простых преобразований, получаем систему соотношений связи производных по координатам от компонент скорости и их комбинаций с составляющими тензора скорости деформирования. (1). Эти выражения необходимы и для нахождения составляющих тензора напряжений (в данном случае скорости изменения) через упругие параметры среды. Но реальные породы принципиально отличаются выраженной пластичностью и нелинейностью связей параметров деформирования и напряжений. Поэтому изучение деформаций или их скоростей изменения представляется естественным и предпочтительным. Наличие избыточных напряжений, которые важны, например, для прогнозных оценок, следует исходить из других принципов. В частности, признаками избыточных напряжений могут быть локализованные экстремальные значения пространственных градиентов различных полей движений и их производных. Это предположение было положено нами в основу концепции анализа и интерпретации современных движений.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial x} &= Exx; \quad \frac{\partial V_y}{\partial y} = Eyy; \quad \frac{\partial V_z}{\partial z} = Ezz; \\ Exy = Eyx &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right); \quad Eyz = Ezy = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right); \\ Ezx = Ezx &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$Exx \quad Exy \quad Ezx$

$Eyx \quad Eyy \quad Eyz$

$Ezx \quad Ezy \quad Ezz$

– симметричная матрица расположения тензора скорости деформации.

Поэтому нами была предложена более удобная схема расчета полей деформаций, которая не зависит от модели деформирования и модели среды и основана только лишь на определении понятия деформации. Она базируется на количественной оценке изменений геометрических параметров некоторых простых геометрических фигур, как бы нарисованных на поверхности движущейся среды, характеризуемой векторным полем скорости (Ю.Г. Щерба). За некоторый промежуток времени, в результате различия в движении точек поверхности, фигуры деформируются и приобретают другой вид. Приведение к единице времени относительных или абсолютных параметров изменения элементов виртуальных, простых фигур приближенно определяет и скорость соответствующего вида деформирования (рис.6). Кроме того, предложено использовать элементы классической теории поля к плоскому полю скорости современных движений, полагая, что оно задано непрерывно в каждой точке поверхности. Так как скорости пунктов это по сути скорости движения вещества, из которого построена верхняя часть коры, то и соответствующие параметры деформирования имеют четкий физический смысл. В частности, можно рассматривать приближенно дивергенцию поля скорости, как всестороннее растяжение-сжатие вещества плоской правильной виртуальной фигуры в виде выпуклого многоугольника с отнесением этой величины к центру фигуры. Требования к параметрам виртуальной фигуры диктуются минимизацией вносимых искажений приближенных оценок. Циркуляция плоского поля скорости – это плоские вихри верхней части вещества коры, отображаемые вектором с направлением по нормали вверх или вниз по отношению к плоскости чертежа. Изменяя в упорядоченном режиме ориентировку эталонного отрезка по азимуту и рассматривая изменение взаимного расположения концов отрезка под действием векторов скорости в течение единицы времени, вычисляется значение относительной скорости деформирования для данного азимута. Значение относится к центру отрезка. Скорости на концах отрезка находятся интерполяцией векторов измеренного поля. Аналогичные процедуры выполняются для ориентированных по азимуту ортогональных пересекающихся отрезков. Изменение угла между ними за единицу времени определяет прибли-

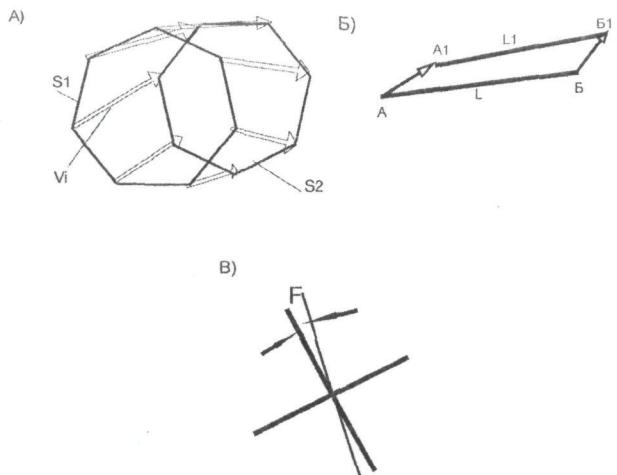


Рис. 6. Простейшие геометрические фигуры, позволяющие произвести приближенное вычисление скоростей деформаций различного вида. А –правильный выпуклый многоугольник, по изменению площади которого за некоторый задаваемый промежуток времени определяют относительную величину скорости деформации всестороннего расширения сжатия в горизонтальной плоскости. Б – отрезок прямой для определения скорости линейной относительной деформации в заданном азимутальном направлении. В – ортогональные пересекающиеся отрезки в плоскости поля скорости, по изменению угла между которыми определяют деформацию сдвига для заданной ориентировки фигуры по азимуту. Показанные смещения и изменения параметров фигур сильно увеличены

женное значение деформации сдвига в точке пересечения отрезков. Значения скоростей деформирования являются приближенными, так как параметры эталонных фигур имеют конечные размеры, используется интерполяирование значений реально измеренных скоростей, предполагается, что скорости остаются неизменными в течении выбранной единицы времени. Ее значение удобно принимать, равным одному году. По определению и из рассмотренной схемы вычислений следует, что скорости линейных относительных деформаций имеют период в  $180^\circ$  по отношению к азимутальному углу, такой же период характерен и для скорости деформации сдвига. Скорость всесторонней горизонтальной относительной деформации от азимутального направления не зависит. Циркуляцию можно рассматривать как скалярную величину, так как ее вектор перпендикулярен к плоскости поля скорости, а следовательно возможно построение карт как скалярной непрерывной функции. Предложенная методика расчетов полей деформаций для процессов, зависящих от азимутального направления, позво-

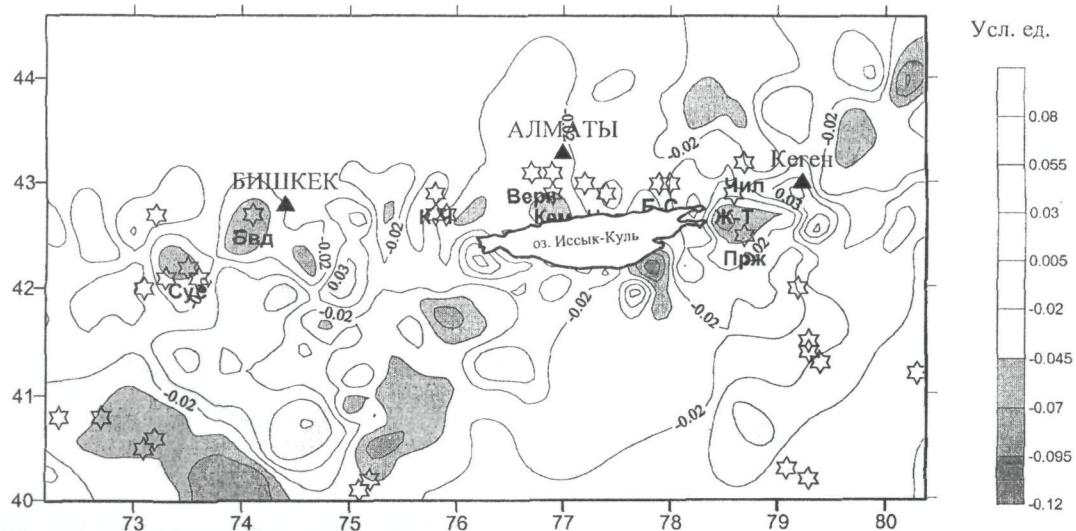


Рис. 7. Циркуляция вектора горизонтальной скорости современных движений на территории юго-востока Казахстана и Северного Тянь-Шаня, отображающая мелкоблочную структуру с эпицентрами сильнейших землетрясений на периферии. В поле циркуляции хорошо выделяется область Таласо-Ферганского разлома, как зона со сдвиговыми горизонтальными составляющими современных деформационных процессов

ляет получать кинограммы, на которых при компьютерном воспроизведении видно изменение полей деформирования и их особенностей в зависимости от азимута. Кинограммы позволяют просто и эффективно увидеть основные направления деформирования и проявления этих процессов одновременно на всей территории. Отдельные фрагменты кинограмм показаны на рисунках 8 (А,Б,В,Г,Д,Е). Таким образом, в регионе получена, впервые за всю историю его изучения, достаточно подробная количественная схема полей скорости деформирования поверхности под действием тектонических процессов в новейшее время.

Как видно на Северном Тянь-Шане конфигурация полей скорости линейной относительной деформации сильно зависит от азимутального направления. Для различных азимутальных направлений существуют свои характерные распределения полей деформирования. Обращает на себя внимание большое сходство структур полей скорости деформирования линейных относительных деформаций для северо-западного направления и всестороннего деформирования в горизонтальной плоскости (рис.8 В и Ж). Это объясняется тем, что на данной территории Северного Тянь-Шаня основной деформационный процесс происходит наиболее значительно именно в СЗ направлении. Также разнообразны карты по-

лей скорости сдвиговых деформаций, получаемые в результате расчетов для различной ориентации в горизонтальной плоскости эталонной фигуры – ортогональных пересекающихся отрезков прямых (рис. 6.В). Главная особенность здесь состоит в том, что плоские фигуры поля деформирования образуют характерные вытянутые системы в СВ направлении и менее протяженные под углом к этой системе в СЗ направлении.

Своеобразная картина поля циркуляции вектора горизонтальной скорости движения (рис.7). Она состоит как бы из системы мелких смежных ячеек неправильной формы с противоположными знаками циркуляции. Т.е отдельные вихри поля скорости как бы связаны между собой фрикционной связью и вращаются в противоположные стороны. Вихри сравнительно мелки и имеют характерные размеры в пределах нескольких десятков километров.

Выделяющиеся блоки с противоположными знаками циркуляции граничат между собой по вероятным переходным зонам разрывных нарушений с компонентами сдвиговых горизонтальных смещений крыльев на современном этапе геодинамического процесса региона. Для центральных областей Северного Тянь-Шаня имеет место мелкоблочная структура коры, которая и определяет особенности сейсмических процессов этой зоны, что будет рассмотрено в после-

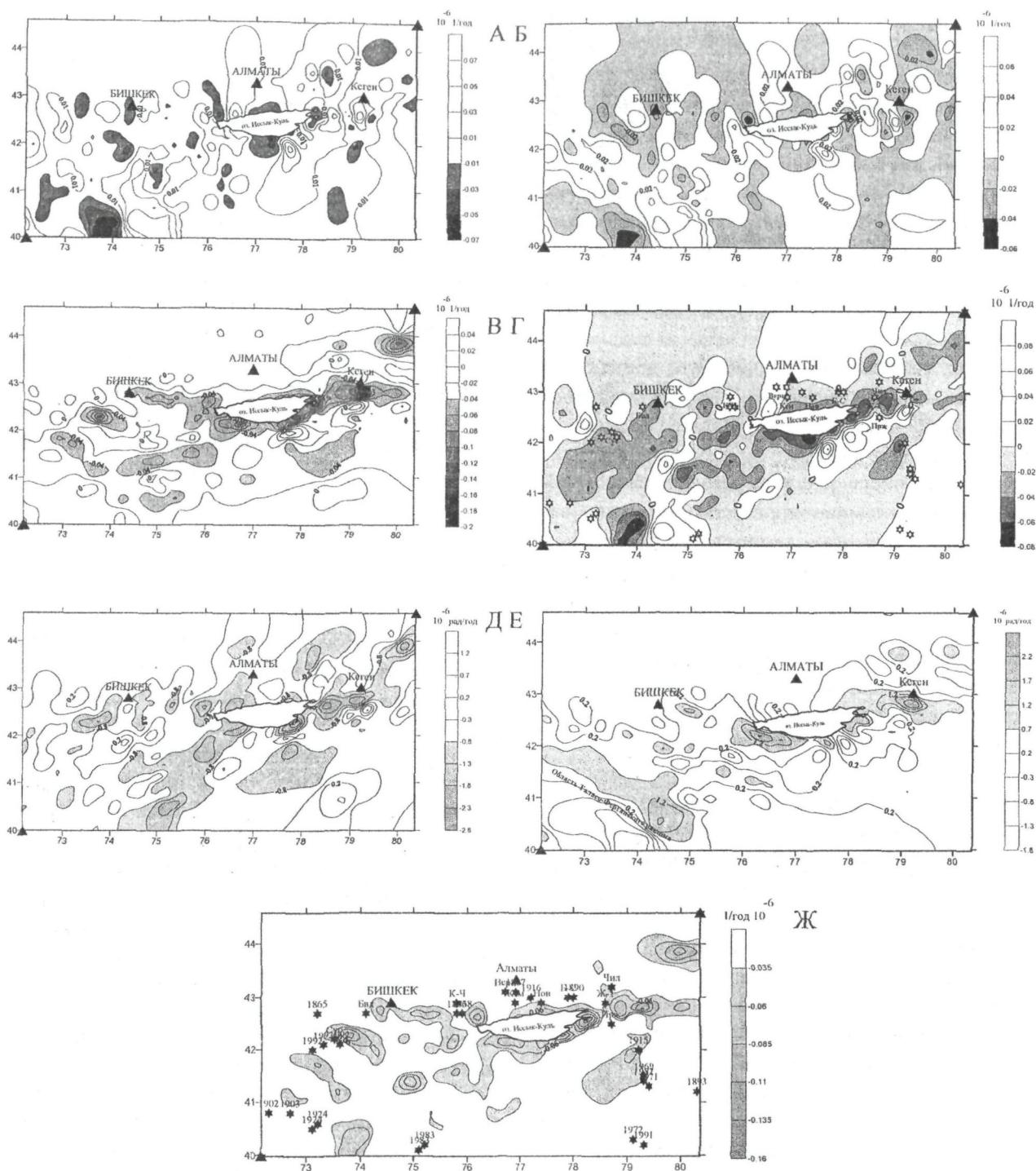


Рис. 8. (А,Б,В,Г,Д,Е) Отдельные кадры скорости линейной относительной деформации для юго-востока Казахстана и Северного Тянь-Шаня из кинограммы для последовательности азимутальных направлений:  
 А – азимут деформирования  $90^{\circ}$ ; Б –  $-66^{\circ}$ ; В –  $0^{\circ}$ ; Г –  $300^{\circ}$ . Скорости деформации сдвига: Д – азимут  $-48^{\circ}$ ;  
 Е –  $300^{\circ}$  с четко проявленной областью Таласо-Ферганского разлома. Примерно в этих азимутальных направлениях на Северном Тянь-Шане сформированы две системы сдвиговых деформаций регионального масштаба под углом одна к другой. Ж – карта скорости относительной деформации сжатия-расширения (дивергенция скорости горизонтальных движений), имеющая сходство по конфигурации с картой скорости относительной линейной деформации для азимута  $0^{\circ}$  (В), т.к. в этом направлении происходит процесс преимущественного современного движения вещества коры

дующих публикациях. Приведенные результаты расчетов полей деформирования представляют часть необходимых материалов, получаемых на этапе интерпретации для формирования научно и экспериментально обоснованных выводов о геодинамическом состоянии региона, необходимых для прогноза. Таким образом, использование новейшей технологии изучения современных движений позволяет получить принципиально новые данные для анализа. В настоящее время пока далеко не изучены открывающиеся в связи с этим возможности.

Из рассмотренного следует, что достаточно глубокая интерпретация современных движений поверхности возможна в результате представления этих данных в некотором наборе их характеристик. В их числе: распределение на изучаемой территории векторов скорости горизонтальных движений и отдельно скорости вертикальных движений, разнообразных полей скорости деформирования, карт ортогональных компонент горизонтальной скорости, карт циркуляции вектора скорости, карт составляющих тензоров скорости линейного относительного деформирования и карт составляющих скорости сдвиговых горизонтальных деформаций для различных азимутальных направлений. Отдельный интерес представляют карты горизонтального градиента различных полей как исходных полей компонент скорости, так и производных из этих полей. Являясь индикатором контрастных изменений полей, карты градиентов указывают на области возможных повышенных напряжений в коре. Получение этой информации требует затрат определенного времени, что неизбежно создает разрыв между получением исходных данных и возможным их объективным истолкованием. Особо принципиальный характер этот вопрос принимает, когда необходим оперативный прогноз. Разрыв во времени между наблюдениями и первичной обработкой принципиально ограничивает оперативность, как минимум, на этот промежуток времени. Здесь сокращением разрыва может быть только переход на перманентные наблюдения с непрерывным процессом параллельно проводимой первичной обработкой данных. Пока с использованием в массовом порядке временных пунктов в наших условиях можно рассчитывать лишь на долгосрочный прогноз геодинамического состоя-

ния региона. Интересно отметить, что привлечение к прогнозным выводам более глубокой информации с расчетами многообразного числа производных по отношению к исходным данным полей значительной задержки окончательных выводов не вызовет при условии организации всех видов работ специализированными, постоянно действующими группами исполнителей. Можно ожидать, что в этом случае окончательные результаты могут быть получены в течение нескольких дней, что вполне соответствует требованиям оперативного прогнозирования. Если не требуется глубокая обработка данных, то оперативная информация о быстро происходящих геодинамических событиях может быть получена практически в реальном времени. В этой связи интерес представляет сообщение о системе диагностики сильных сейсмических событий в районе г. Лос-Анжелеса. (США) [13], в основе которой 250 приемников GPS, работающих в режиме приема спутниковых сигналов с частотой опроса 1 с, размещены на площади в пределах очаговой зоны сильных землетрясений. В пределах апертуры расположения пунктов приема с известными координатами всегда может быть предсказана структура разности фаз несущих частот спутников на любой предстоящий момент времени. Закономерное нарушение предсказываемой структуры фазовых соотношений по площади апертуры с высокой степенью вероятности является признаком фронта движущейся волны. По этому признаку вырабатывается сигнал предупреждения о крупном сейсмическом событии и формируется команда на отключение опасных потребителей электроэнергии не более, чем за 8-10 с до прихода сейсмической волны. Здесь использован эффект высокой чувствительности системы к разности фаз когерентных сигналов. Помехи в данном случае действуют почти синхронно на все приемники, и при сравнительно небольших размерах апертуры незначительно влияют на фазовые соотношения сигналов, в отличие от упорядоченного смещения одной группы приемников по отношению к другой за счет смещений, вызываемых волновым процессом сильного землетрясения.

Подводя основные итоги методическим аспектам применения высокоточных GPS-измерений, отметим следующее.

Ведение мониторинга геодинамического состояния на основе технологии GPS обеспечивается тремя видами согласованных, но вполне самостоятельных работ:

- закладка пунктов сетей наблюдения и ведение полевых измерений;

- первичная обработка данных и создание баз исходных данных и результатов первичной обработки;

- интерпретационная обработка результатов первичной обработки, анализ и формирование геодинамической информации о состоянии коры и более глубоких частей литосферы.

В Республике Казахстан мониторинг геодинамического состояния литосферы (в первую очередь коры и верхней мантии) необходим для выяснения реального геодинамического состояния территорий в сейсмически активных регионах, площадях интенсивной техногенной нагрузки.

На основании уже полученных принципиальных результатов и опыта в отработке технологии можно считать, что альтернативы методам, основанным на использовании космических технологий (GPS и радиоинтерферометрия), практически не существует.

Мониторинг должен обеспечить решение двух важнейших задач:

- уточнение реальной геодинамической обстановки и особенностей современного тектонического процесса на территории Республики;

- стать источником основных сведений о вариациях геодинамических процессов и, особенно, для выявления их критической направленности.

Развитие мониторинга на основе технологии GPS предполагает стадийность и должно базироваться на создании сетей регионального характера, в основном по площадям, и локальных сетей для мониторинга на отдельных объектах. Все сети должны быть увязаны в единую систему. Региональные сети могут иметь различную плотность пунктов и должны быть продолжением уже созданных сетей..

Этапы развития региональных сетей должны предусматривать на первых порах создание временных пунктов с последующей их постепенной заменой на пункты постоянных наблюдений.

Оперативность мониторинга должна обеспечиваться созданием центров оперативной обработки данных. Для масштабов работ в Казах-

стане таких центров должно быть не менее двух.

В научном аспекте важнейшим представляется дальнейшее исследование связи особенностей современных движений на поверхности с процессами, идущими в толще коры и мантии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев С., Качалин М. DT/6 – станция генерации дифференциальных поправок GPS . Обзор глобальной системы место определения NANSTAR и дифференциального метода навигационных измерений. <http://www.cta.ru>

2. Миди Б.Дж., Хагер Б.Х. Современное распределение деформации в западном Тянь-Шане по блоковым моделям, основанным на геодезических данных / Геологи и геофизика, 2001, т. 42, № 10, с. 1622-1633.

3. Нусипов Е.Н., Щерба Ю.Г., Рахымбаев М.М. и др. Методическое руководство по ведению мониторинга современных движений высокоточными спутниковыми GPS-наблюдениями для прогноза геодинамического состояния территорий и нефтегазовых месторождений. Алматы , 2004, 133 с.

4. Панжин А.А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS / Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, 2002.

5. Панжин А.А., Коновалова Ю.П. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий / Институт горного дела УрО РАН.

6. Прилепин М.Т. Концепция использования глобальных спутниковых систем для прогноза землетрясений. Объединенный институт физики Земли РАН, г. Москва.

7. Прилепин М.Т. Использование глобальных спутниковых систем для изучения деформаций земной коры // "Динамика континентальной литосферы" Подвижные пояса. Под ред. Н.А. Логачева и В.С. Хромовских. М., Недра, 1994.

8. Прилепин М.Т., Баласанян С.Ю., Баранова С.М. и др. Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GPS технологий. Физика Земли, 1997, №6.

9. Самойлов А. GPS на земле, на воде, в небе. / Журнал "Капитан-клуб", № 2, 1999.

10. Abdurakhmatov K. Ye., Aldazhanov S.A. Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T.A. и др. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates/ Nature, vol. 384? 5 December? 1996, pp. 450-453.

11. Leick A. GPS satellite surveying (second edition) Department of Surveying Engineering/ University of Main. Orono, Main AWiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, inc. New York / Chichester /Toronto / Brisbane / Singapore/ 1994, 560 p.

12. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H. and Collins J. GPS Theory and practice (fifth, revised edition)/ Springer Wien New York/ 1992, 1993, 1994, and 2001, 383 p.

13. Кен Хаднат GPS предупреждает о скором землетрясении. [http://www.mclab.ru/show\\_news.php?IDN=473](http://www.mclab.ru/show_news.php?IDN=473).