

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ НА БОЛЬШИХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ БАЗАХ

Панжин А. А. – Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург
Соколова О. В. – ЗАО «УралГЕОтехнологии», Екатеринбург

Аннотация. В статье приведены результаты деформационного мониторинга на больших пространственно-временных базах с использованием данных постоянно действующей GPS станции Института горного дела УрО РАН. Пространственные базы мониторинга составили от 3,5 до 2000 км, а временные – от одного месяца с дискретность в один час до 1370 суток с дискретностью измерений в 24 часа. В результате экспериментальных работ были установлены трендовые смещения породного массива, коррелирующие с аналогичными данными, полученными для GPS станции Артинской геофизической обсерватории и знакопеременные смещения с периодами от 1,25 года до 4 часов. Разработанная методика измерений и камеральной обработки GPS-векторов на больших пространственно-временных базах с высоким уровнем точности позволяет определять трендовые и знакопеременные деформации породного массива на различных иерархически-блочных уровнях.

DEFORMATION OF NATIONAL MASSIFS AT GREAT SPATIAL-TEMPORAL BASES

Panzhin A.A. – Institute of mining art UB of RAS, Yekaterinburg
Sokolova O.B. – Closed-Joint Stock Company «UralGeotechnology», Yekaterinburg

Abstract. The results of deformation monitoring at great spatial-temporal bases with use of the data of continually operating GPS-station of the mining art Institute UB of RAS are adduced. Monitoring spatial bases made up 3,5–2000 km, and temporal ones – from one month (in steps of one hour) to 1370 days (in steps of 24 hours). The results of experiments helped to define trend displacements of rock massif, correlated with analogous data, obtained for GPS-station of the Arti geophysical observatory, and sign-variable displacements with periods from 1,25 year to 4 hours. The developed method of measurements and processing in a laboratory of GPS-vectors at great spatial-temporal bases with high level of accuracy allows to determine trend and sign-variable deformations of rock massif at different hierarchical-block levels.

При решении различных задач геомеханики необходимо знать параметры первоначального напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива и закономерности его изменения во времени. Для реального массива, имеющего иерархически-блочное строение, эти параметры необходимо определять на пространственно-временных базах разных масштабных уровней. До недавнего времени геодинамические исследования в ИГД УрО РАН проводились на локальных пространственно-временных базах, линейные размеры которых не превышали 10–15 км, а измерения носили дискретный характер и производились не чаще 4 раз в год. Следует отметить, что в Уральском регионе непрерывные геодинамические наблюдения производились GPS-станцией ARTU на базах порядка

1600 км. С запуском в апреле 2003 года в эксплуатацию стационарной GPS-станции ЕКТВ появилась возможность непрерывного мониторинга геодинамического состояния массива на базах измерений от первых сотен метров до 2000 км.

GPS – одна из наиболее точных глобальных систем определения координат. В настоящее время эта система широко используется для высокоточных координатных определений как при производстве топографо-геодезических работ, так и в научных исследованиях, связанных с вопросами геодинамики и геомеханики. Однако точность системы ухудшают ряд факторов, возникающих из-за влияния атмосферных явлений и солнечной радиации на параметры спутниковых сигналов, ухода часов спутников и т.п. Такие ошибки можно зна-

чительно уменьшить, применив дифференциальную коррекцию с использованием стационарного GPS-приемника, установленного в точке с заранее определенными координатами. Такой приемник называют базовым. С помощью этого приемника можно вычислять корректирующие значения погрешностей, возникающих в дальномерных спутниковых сигналах.

На сегодняшний день самым распространенным методом коррекции спутникового сигнала является метод дифференциальной коррекции в постобработке. Этот метод основан на накоплении данных для последующей дифференциальной коррекции на базовой станции, которая состоит из приемника с антенной, компьютера и соответствующего программного обеспечения. Мобильный GPS-приемник также накапливает данные в собственной памяти или в памяти мобильного компьютера в объеме, достаточном для последующей дифкоррекции. По окончании работ данные базы и мобильного GPS-приемника совместно обрабатываются при помощи специального программного обеспечения.

В связи с вышесказанным, актуальным является вопрос о выборе базовой GPS-станции и обеспечении ее бесперебойной работы во время всего сеанса спутниковых наблюдений. Наиболее предпочтительным вариантом размещения базовой станции является постоянно действующая базовая GPS-станция, работающая в полностью автоматическом режиме.

Весной 2003 г. Институт горного дела Уральского отделения РАН реализовал проект постоянно действующей GPS-базовой станции в Екатеринбурге (ЕКТВ). Целью данного проекта является обеспечение непрерывными GPS-данными всех заинтересованных потребителей с возможностью удаленного доступа к ним через сеть Internet. Постоянно действующая GPS-базовая станция находится в самом центре Екатеринбурга. Ядром системы является двухчастотный GPS-приемник Trimble серии 4000SSE, работающий под управлением программного обеспечения Trimble Reference Station и антенна Trimble Compact L1/L2. Прием-

ник круглосуточно записывает в компьютер данные для постобработки в формате RINEX с интервалом в 5 сек. Продолжительность одного файла данных составляет четыре часа, после чего он архивируется и выкладывается в Internet на FTP сервер.

Различные производители GPS-оборудования рекомендуют практически одинаковые методики полевых работ, но при этом есть некоторые различия в максимальном удалении от базовой станции, которые надо учитывать для получения заданной точности, в зависимости от типа приемников и компании изготовителя. Для оценки радиуса действия базовой станции, при использовании различных типов GPS-приемников, за основу взяты рекомендации компании Trimble по использованию оборудования и наш практический опыт работ с GPS-приемниками Trimble. Для одночастотных фазовых GPS-приемников радиус действия составляет 15 км (максимум до 20 км); радиус действия для двухчастотных фазовых приемников при использовании бортовых эфемерид – 50 км (максимум до 150 км), при использовании точных эфемерид максимальный радиус действия увеличивается до 2000 км.

Успешная реализация данного проекта открыла широкие перспективы для использования накопленных данных постоянно действующей GPS-базовой станции для производства как прикладных топографо-геодезических работ, так и исследовательских работ, связанных с изучением современной геодинамики Уральского региона. При производстве прикладных работ использование данных, накопленных базовой GPS-станцией, позволяет отказаться от установки своей локальной базовой станции и использовать освободившийся приемник для полевых работ; для комплекта из 2-х приемников GPS производительность увеличивается в два раза. Данные базовой GPS-станции также используются для увеличения надежности геодезических определений путем включения пункта базовой GPS-станции в локальную сеть для улучшения ее конфигурации и контроля точности замкнутых геодезических построений.

Удачное географическое расположение базовой GPS-станции – на восточном склоне Уральского хребта, в окружении многочисленных объектов техногенного воздействия на верхнюю часть земной коры – крупных месторождений полезных ископаемых, предопределяет использование данных базовой станции при проведении исследований современной геодинамики Уральского региона.

В настоящее время исследования проводятся по двум направлениям – с одной стороны, определяются собственные пространственные движения базовой GPS-станции относительно пунктов глобальной геодинамической сети IGS, расположенных в радиусе до 2000 км от Екатеринбурга, а с другой стороны, к данной станции привязаны локальные геодинамические полигоны, на которых Институт горного дела производит регулярные исследования современной геодинамики.

Основная часть локальных геодинамических полигонов, приуроченных к крупным месторождениям полезных ископаемых, расположена в 100–200 км от базовой станции ЕКТВ, что позволяет не только определять изменения деформационного поля в районе ведения горных разработок,

но и определять параметры напряженно-деформированного состояния большей части Уральского региона.

Однако учитывая то обстоятельство, что GPS-измерения на горных предприятиях производятся эпизодически – до четырех раз в год, наиболее целесообразным в настоящее время представляется постановка эксперимента по мониторингу напряженно-деформированного состояния массива горных пород с совместным использованием данных станции ЕКТВ и станций постоянного мониторинга сети IGS (International Geodynamic Service). В радиусе от 1500 до 2000 км от базовой станции расположено шесть мониторинговых станций сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu>), которые представлены на рис. 1.

Характеристика станций мониторинга с указанием расстояний до станции ЕКТВ приведена в табл. 1.

Все указанные станции непрерывно накапливают сырые данные, которые в дальнейшем становятся доступными в сети Internet. Также для обработки векторов длиной 1500–2000 км необходимы точные эфемериды GPS-спутников, которые становятся доступны через 15–20 дней после проведения полевых измерений.

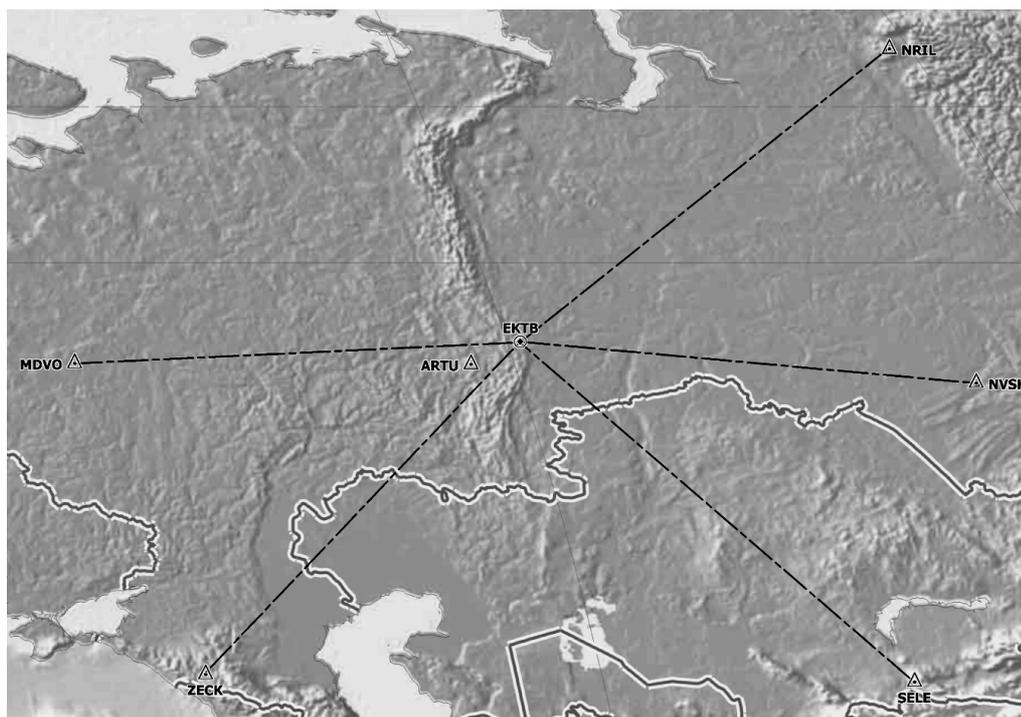


Рис. 1. Схема расположения мониторинговых станций IGS сети относительно станции ЕКТВ

Таблица 1. Характеристика станций мониторинга сети IGS, участвовавших в экспериментах

Код станции	Местоположение станции	Расстояние до ЕКТВ, км
MOBN	г. Менделеево, Московская область, Россия	1 502
NRIL	г. Норильск, Красноярский край, Россия	1 937
NVSK	г. Новосибирск, Россия	1 425
ZECK	ст. Зеленчукская, Карачаево-Черкесия, Россия	1 966
SELE	г. Алматы, Казахстан	1 904
ARTU	г. Арти, Свердловская область, Россия	134

На первом этапе эксперимента для камеральной обработки GPS-измерений использовалось программное обеспечение Gamit 10.30, специально адаптированное для решения сверхдлинных векторов, данные для определения которых накапливались в течение 24 часов. Обработка данных производилась в полуавтоматическом режиме с использованием сервиса SCOUT (Scripps Coordinate Update Tool), с получением текущих координат станции ЕКТВ в динамической системе координат ITRF-2005 (International Terrestrial Reference Frames), позволяющей анализировать трендовые смещения станции в пространстве.

В камеральной обработке результатов наблюдений на станции ЕКТВ использовались данные пяти мониторинговых станций сети IGS, приведенные в табл. 1 и на рис. 1, кроме наиболее близко расположенной станции ARTU. Это было сделано с целью получения независимых друг от друга временных серий изменения пространственных координат станций ЕКТВ и ARTU для анализа относительных смещений станций.

Координаты станции ЕКТВ за период 2003–2007 г.г. были определены с использованием вышеупомянутого сервиса SCOUT, свободный доступ к которому открыт на сайте SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center). В результате с

дискретностью в 1 сутки был получен временной ряд пространственных координат в системе ITRF-2005 станции ЕКТВ. Аналогичные координаты за этот же временной промежуток были получены для станции ARTU из архива данных SOPAC. Для временных рядов по компонентам N (север-юг), E (запад-восток) и H (высота) были вычислены скорости абсолютных смещений станций ARTU и ЕКТВ, а также, по разности скоростей абсолютных смещений – смещения станций относительно друг друга.

Результаты определения скорости абсолютных смещений приведены в табл. 2.

При анализе временных рядов абсолютных смещений станций ARTU и ЕКТВ кроме трендовых смещений (рис. 2) отмечаются также знакопеременные смещения с периодом около одного года. Причем подобные знакопеременные смещения наблюдаются и на станциях, расположенных в экваториальных областях Земли, где не проявляются сезонные факторы.

Для более детального исследования знакопеременных смещений и относительных трендовых смещений станций ARTU и ЕКТВ относительно друг друга, на следующем этапе была выполнена совместная камеральная обработка данных, накопленных станциями. На этом этапе использовалось специальное программное обеспечение –

Таблица 2. Абсолютные и относительные смещения станций ARTU и ЕКТВ

Исследуемая компонента	Тренд по станции ARTU	Тренд по станции ЕКТВ	Разность трендов ARTU-ЕКТВ
N (север-юг)	4,4 мм/год	5,3 мм/год	0,9 мм/год
E (запад-восток)	25,1 мм/год	25,6 мм/год	0,5 мм/год
H (высота)	-0,3 мм/год	-1,3 мм/год	-1,6 мм/год

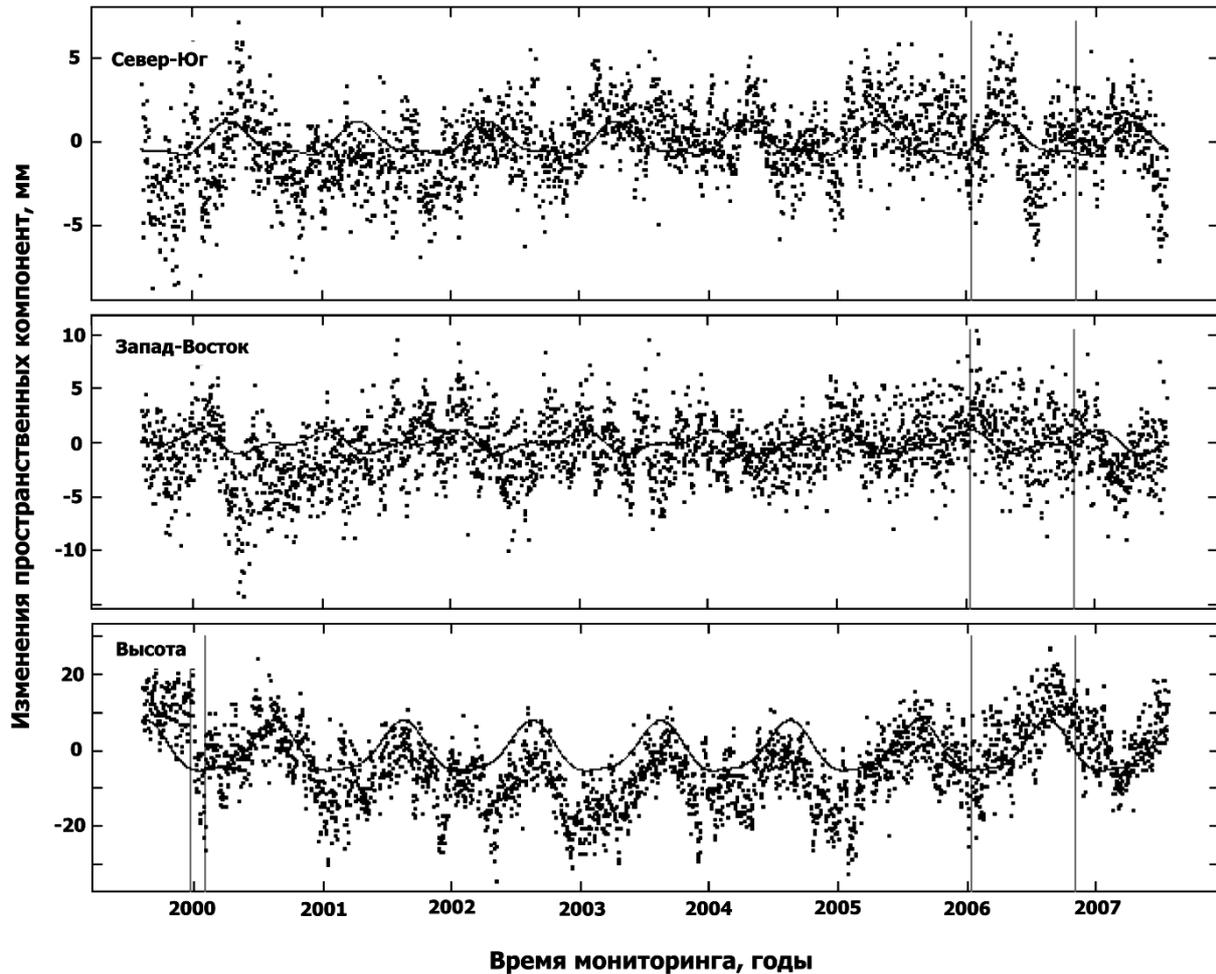


Рис. 2. Временные ряды абсолютных смещений станции ARTU с трендовыми и знакопеременными смещениями

Trimble Total Control (ex-GeoGeneus), адаптированное для решения длинных векторов. Обработка данных производилась в полуавтоматическом режиме с использованием набора шаблонов вычислений с оптимальными параметрами и правилами обработки базовых линий, установленных опытным путем. Поскольку при проведении геодинимического мониторинга необходимо сравнивать равноточные измерения, достаточно остро стояла проблема создания набора шаблонов и правил обработки, гарантирующих получение целочисленного решения для векторов.

Станция ARTU расположена на западном склоне Уральского хребта, в 135 км к юго-западу от Екатеринбурга, на базе геофизической обсерватории «Арти» Института геофизики УрО РАН. Относительная близость базовых станций ARTU и ЕКТВ

определяет возможность качественного расчета компонент вектора между этими станциями, изменения которых во времени представлены в табл. 3. и на рис. 3.

Среднеквадратическая ошибка определения компонент вектора по результатам суточных измерений не превышала 0,5 мм (2σ). Дискретность интервала обработки была принята равной одним суткам. Оценивались изменения компонент вектора ARTU-ЕКТВ: N (север-юг), E (запад-восток), H (высота) и L (расстояние между станциями). Обработке был подвергнут временной интервал равный 1370 суткам – с 2003 по 2007 год.

На данном этапе исследований оценивались изменения компонент вектора ARTU-ЕКТВ и определялись гармоника знакопеременных смещений компонент вектора по методике, приведенной в [1].

Таблица 3. Относительные смещения станций ARTU и ЕКТВ и гармоники знакопеременных смещений

Исследуемая компонента	Тренд по интервалу ЕКТВ-ARTU	Гармоники знакопеременных смещений	Разность трендов ARTU-ЕКТВ (см. табл. 2)
N (север-юг)	0,5 мм/год	456 сут.=1,25 года	0,9 мм/год
E (запад-восток)	0,2 мм/год	342 сут., 182,5 сут.=0,5 года	0,5 мм/год
H (высота)	-1,8 мм/год	342 сут., 182,5 сут.=0,5 года	-1,6 мм/год
L (расстояние)	0,02 мм/год	342 сут.	-

Как видно из данных, приведенных в табл. 3., полученные из двух независимых решений тренды компонент вектора ARTU-ЕКТВ совпадают в пределах точности измерений, что позволяет в дальнейшем определять абсолютные величины пространственных смещений станции ЕКТВ менее трудоемким способом – через изменения компонент вектора ARTU-ЕКТВ.

Выявленная разность трендов пространственных смещений ARTU-ЕКТВ свидетельствует о различном характере деформирования породных массивов, расположенных на западном (ARTU) и восточном (ЕКТВ) склонах Уральского хребта, при этом скорости смещений станции

ЕКТВ в горизонтальной плоскости на 20% выше, чем скорости смещений станции ARTU, а в вертикальной плоскости – превышает в 4 раза.

Также на графиках изменения компонент вектора ARTU-ЕКТВ и расстояний между станциями (рис. 3) очень контрастно проявляется знакопеременный характер деформирования породного массива. В результате проведения спектрального Фурье-анализа были определены основные гармоники временных рядов. Ряд выявленных гармоник, кратных 0,25 года свидетельствует об имеющем место сезонном факторе, однако наиболее контрастным является период в 342 суток, не совпадающий с сезон-

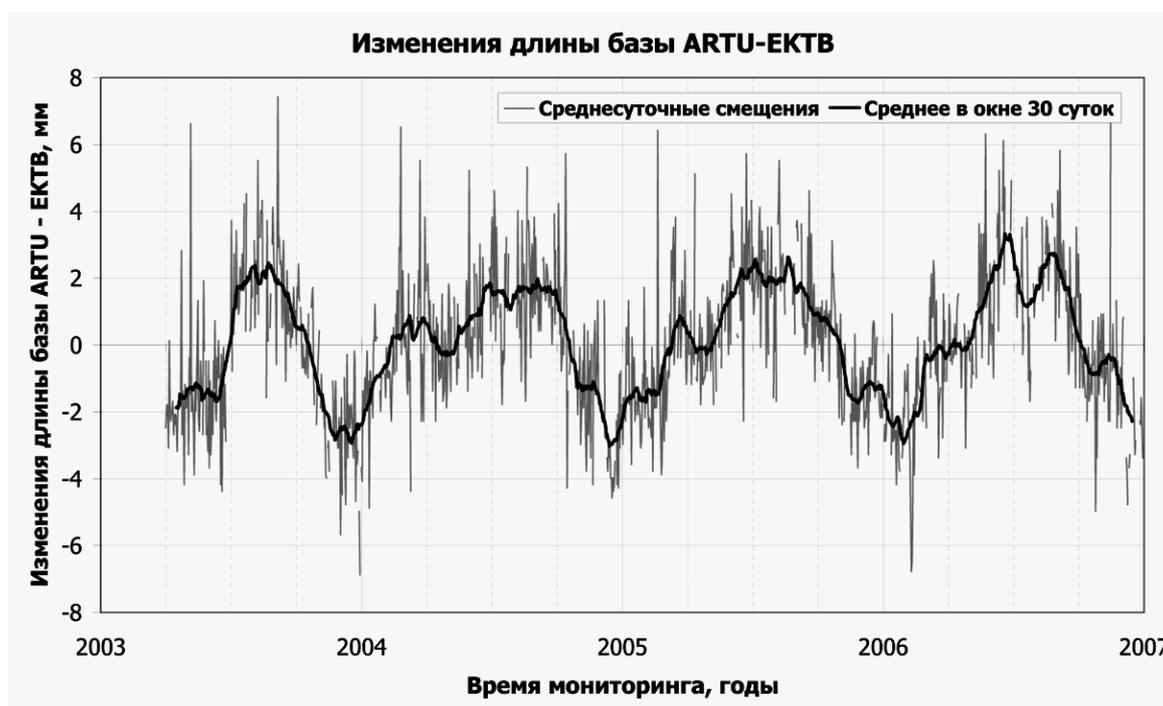


Рис. 3. Изменения длины интервала ARTU-ЕКТВ

ным. Окончательные же выводы о наличии или об отсутствии сезонного фактора в деформировании породных массивов на больших базах могут быть сделаны после проведения дополнительных измерений на временных базах, превышающих сезонную гармонику минимум в 10–15 раз.

Для уточнения гармоник знакопеременных деформаций породного массива на больших пространственно-временных базах был поставлен дополнительный эксперимент. Поскольку достаточно большое расстояние между станциями ARTU и ЕКТВ не позволяет увеличить дискретность измерений выше, чем один раз в сутки, для исследований знакопеременных деформаций породного массива на малых временных базах использовались данные, накопленные станцией UGTU, принадлежащей ОАО «УралГеоТехнологии», расположенной в Екатеринбурге в 3,5 км юго-западнее станции ЕКТВ, как показано на рис. 4(цветная вкладка).

Станции UGTU и ЕКТВ расположены на разных крыльях мощного тектонического нарушения субмеридионального про-

стирания, пересекающего город по центральной части, что создает предпосылки о наличии знакопеременных деформаций породного массива, которые можно обнаружить с помощью геодезических GPS-измерений. В результате эксперимента, который проводился в течение мая 2007 г., были определены деформации породного массива с дискретностью в один час, представленные на рис. 5.

Как и в предыдущих случаях, оценивались изменения компонент вектора N (север-юг), E (запад-восток) и H (высота), с определением гармоник знакопеременных деформаций по спектральному анализу Фурье. В результате были получены основные гармоники знакопеременных деформаций породного массива равные 24 часам (одни сутки), кроме этого достаточно сильные гармоники вертикальных деформаций с периодом 4 часа, что соответствует уже выявленным гармоникам короткопериодных деформаций, полученных на малых пространственно-временную базам.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных работ была разра-

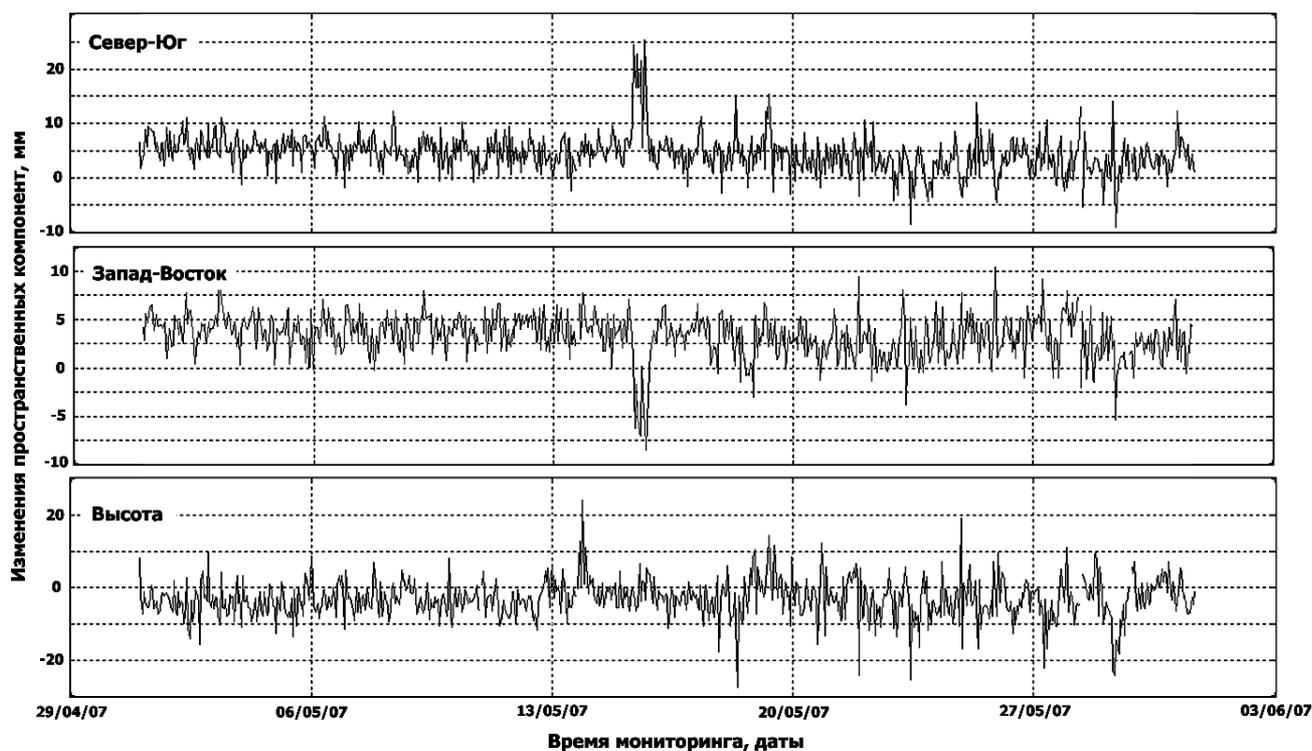


Рис. 5. Изменения пространственных компонент вектора UGTU-EKTU

ботана и опробована для условий Уральского региона методика измерения и камеральной обработки GPS-векторов на больших пространственно-временных базах с высоким уровнем точности и получены данные о геодинамической активности массива горных пород на базах от 3,5 до 2000 км. Основной ее особенностью является использование не требующей значительных капитальных вложений корпоративной GPS-инфраструктуры и существующей сети IGS-станций.

При переходе от больших пространственно-временных баз к малым было получено соответствие гармоник на периоде в 4 часа, что позволяет говорить о знакопеременных деформациях породного массива на различных иерархически-блочных уровнях как о форме существования геологической среды.

Полученные в результате экспериментов результаты свидетельствуют о перспективности продолжения данной работы с целью определения величин деформаций

массива на больших и малых базах и закономерностей их изменения во времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Совета по грантам Президента РФ.

Литература

1. *Панжин А.А.* Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии. Маркшейдерия и недропользование, № 2(8). Апрель-июнь. 2003.
2. *Панжин А.А.* Методы мониторинга короткопериодных деформаций массива горных пород. // Геомеханика в горном деле: Доклады международной конференции. Екатеринбург, ИГД УрО РАН. 2003.
3. *Panzhin A.A., Sashourin A.D., Kostrukova N.K., Kostrukov O.M.* Experimental researches dynamics of displacements in faults zones. // Rock Mechanics – a challenge for society: Proceedings of the ISRM regional Symposium EUROCK 2001, Espoo, Finland. /Balkema/ Rotterdam. Brookfield. 2001.

