УДК 528.06:629.783 (575.2)(04)

ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗАДАННЫХ СМЕЩЕНИЙ GPS АНТЕННЫ

С.И. Кузиков, Т.С. Образцова

На основе GPS измерений с искусственным посуточным смещением антенны в трехмерном пространстве дана оценка фактической точности определения координат и предложен способ более качественного выделения полезного сигнала.

Ключевые слова: GPS; точность; искусственное смещение; система координат.

Введение. В геодинамических исследованиях современных движений земной коры на основе метода Глобальной Системы Позиционирования (Global Positioning System – GPS) в качестве входных данных для анализа используются векторы скорости с размерностью в мм/год [напр., 1−3]. Для получения качественных данных о скорости смещения GPS репера необходимо несколько лет наблюдений, а частота опроса пункта может варьировать от перманентного режима записи до одного раза в год или реже [2]. Более частые и длительные GPS измерения репера повышают точность и степень доверия к данным. Стремление к минимальной частоте опроса GPS сетей и отдельных пунктов в большей мере обусловлено финансово-техническими ограничениями. Именно поэтому на большинстве GPS пунктов в Центральной Азии проводятся эпизодические измерения.

Оценка точности GPS скорости носит вероятностный характер в виде среднего квадратичного отклонения по каждой координате ($\sigma_{x|y|z}$) и чаще всего находится в пределах первых мм/год, что нередко соизмеримо с уровнем тектонических движений данного района. Поэтому сепарация геодинамической составляющей от случайных вариаций движения репера является одной из важных задач при интерпретации GPS данных. Тем более, что в последнее время все чаще возникает потребность в исследовании временных вариаций координат и оценке устойчивости векторов скорости [напр., 4].

Во временном ряде координат корректно отделить геодинамическую составляющую от ошибки GPS измерения далеко не всегда удается. При этом необходимо знать не вероятностную, а фактическую ошибку метода в конкретных условиях получения результата. Анализ посуточных GPS координат для реперов, предположительно неподвижных в течение года друг относительно друга, выявил максимальный размах вариаций горизонтальных компонент до 21 мм (в среднем ≤ 2 мм) [4]. Однако гарантировать стабильность относительного положения даже фундаментальных геодезических тумб в течение любого отрезка времени мы не можем.

Целью настоящей работы является описание эксперимента по оценке фактической точности GPS-метода при посуточном осреднении данных и искусственном смещении антенны в трехмерном пространстве на величины, заведомо превышающие ошибки измерения. Таким образом, можно найти минимальный уровень подвижек, фиксируемых при данных условиях GPS измерений.

Условия эксперимента. В 2009 г. сотрудники НС РАН на базе одного из блоков фотоэлектронного микроскопа создали так называемый "3D-корректор". При помощи этого инструмента стало возможным смещать с миллиметровой точностью в трехмерном пространстве GPS антенну (рис. 1) или другой геодезический прибор. Подвижная в плане платформа 3D-корректора может перемещаться до 22 см в одном направлении и до 10 см – в другом, по вертикали – до 4 см. Две горизонтальные шкалы предусмотрены конструкцией микроскопа, к верхней подвижной платформе добавлены вертикальная шкала и три подъемных винта. Ориентировка прибора по сторонам света осуществляется компасом, горизонтальное положение верхней платформы выставляется при помощи подъемных винтов и сферического пузырькового уровня.

В предгорьях Киргизского хребта, в ~ 45 км на юго-восток от г. Бишкек находится площадка детальных геодезических работ Алмалы. На

базе 4-х фундаментальных геодезических тумб (IAT1, IAT3, IAT5, IATA) площадки (рис. 2) и были проведены экспериментальные GPS измерения с 14 по 19 августа 2009 г. На трех геодезических реперах (IAT3, IAT5, IATA) GPS антенны были закреплены неподвижно. На тумбе IAT1 установлен 3D-корректор, который был сориентирован таким образом, чтобы обеспечить смещение антенны в меридиональном, широтном и вертикальном направлениях. На реперe IAT3 установлен GPS приемник TOPCON Legacy-E, на остальных трех реперах – приемники TRIMBLE R-7.

Ежедневно, в начале каждых из 6-ти UTC суток (около 06:00 Бишкекского времени) смещалась GPS-антенна на пункте IAT1 последовательно на юг, восток и вертикально вверх на одинаковую величину по схеме 0 + 2 + 4 + 6 + 8 + 10 = 30 мм. Запись новой позиции производилась в течение ~ 24 часов. Для разделения файлов данных и исключения записи во время движения антенны прибор на пункте IAT1 выключался в конце дня (~ 23:45 UTC) и затем в начале следующего дня включался (~ 00:15 UTC).

Результаты эксперимента. После обработки экспериментальных данных GPS измерений программным пакетом GAMIT/GLOBK 10.35 [5, 6] были получены картезианские геоцентрические координаты для 4-х реперов на каждый из 6 дней измерений. На первом этапе анализа оценим вариации всевозможных базовых линий между 4-мя реперами эксперимента (рис. 3).

Для удобства представления на рис. 3 в каждой выборке, состоящей из 6-ти значений длины одной из базовых линий, все элементы были уменьшены на минимальное значение данной выборки. Минимальные нулевые значения приравнены к 0,01 мм, все графики построены в логарифмическом масштабе. Базовые линии между пунктами IAT3, IAT5 и IATA (антенны которых искусственно не смещались) сравнительно стабильны в течение всего эксперимента, размах вариаций не превышал ~ 0,7 мм. Для посуточного осреднения GPS данных это достаточно хороший показатель устойчивости. Базовые линии с участием искусственно смещаемого пункта IAT1 максимально изменяют свои длины от ~ 2 до ~ 30 мм. Разница в размахах вариаций этих базовых линий объясняется взаимным пространственным положением пунктов и направлениями смещений (см. рис. 2).

Поскольку координаты были рассчитаны в метрической картезианской системе относительно центра Земли, то их необходимо преобразовать в локальную систему координат, в которой осуществлялись смещения. Обозначим картезианскую геоцентрическую систему координат как *OXYZ*, где *O* – центр масс Земли; ось *OZ* – ось вращения Земли; а плоскость *XOZ* проходит через меридиан Гринвича (рис. 4).

Таким образом, в рамках нашего эксперимента вычисленная оценка смещений антенны репера IAT1 представлена в *OXYZ*, а фактические смещения осуществлялись в локальной системе координат *LNEH* (рис. 4). Здесь: *L* – начало координат; *LH* – ось вертикальной компоненты, совпадающая с радиус-вектором к точке *L*; *NLE* – плоскость нормальная к радиус-вектору точки *L*;



Рис. 1. Вид 3D-корректора с GPS антенной на геодезической тумбе.

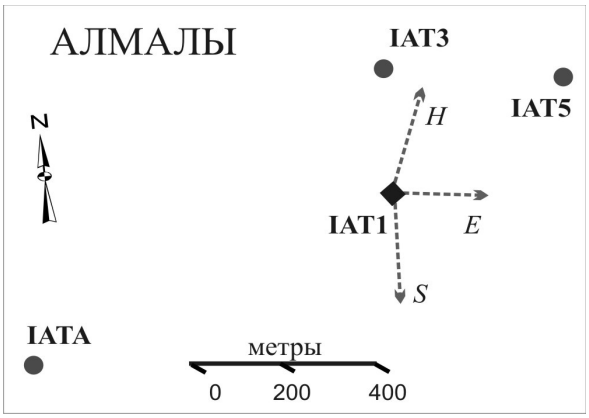


Рис. 2. Положение измеряемых реперов геодезической площадки Алмалы. На IAT1 установлена GPS антенна с 3D-корректором, на других тумбах антенны неподвижны.

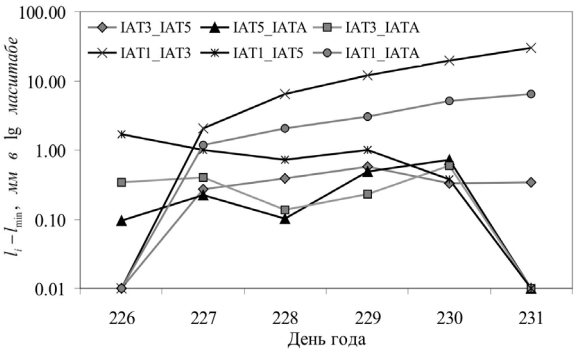


Рис. 3. Посуточные вариации длин шести базовых линий относительно минимальных значений (≈ 0.01) в логарифмическом масштабе.

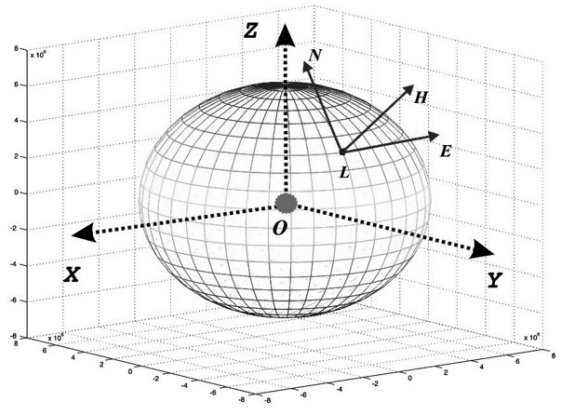
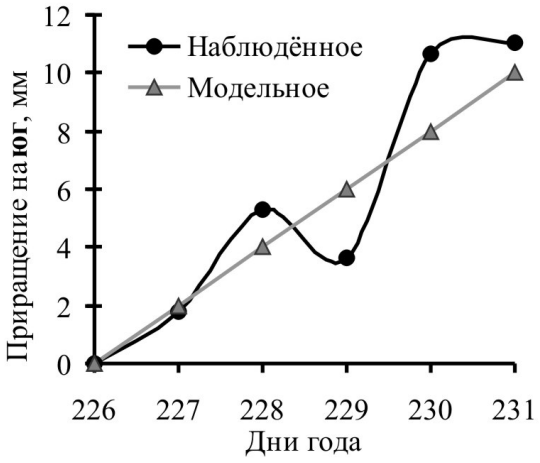
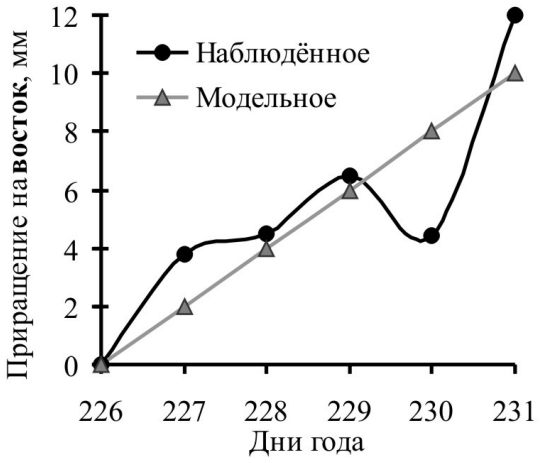


Рис. 4. Положение локальной системы координат (*LNEH*) относительно геоцентрической картезианской системы координат (*OXYZ*).





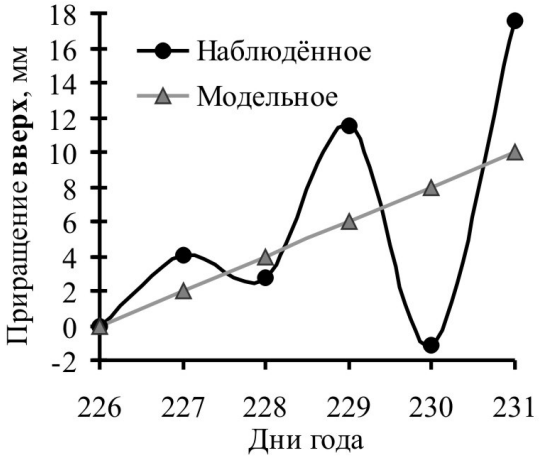


Рис. 5. Модельные и наблюдённые графики посуточных приращений координат пункта IAT1 на юг, восток и вертикально вверх. Наблюдённые приращения компонент вычислены относительно статичного пространственного центра *L* и системы отсчета *LNEH*.

LN – ось северной компоненты, пересекающаяся с осью *OZ*; а *LE* – ось восточной компоненты, дополняет систему до левостороннего базиса. Преобразование системы координат *OXYZ* в *LNEH* можно осуществить стандартными процедурами [напр., 7]. Но при выборе начала координат для *LNEH* возникает неоднозначность, варианты которой могут различным образом влиять на точность оценки относительного положения исследуемых GPS реперов.

Первый метод преобразования координат из *OXYZ* в *LNEH* характеризуется тем, что в качестве начала локальной системы координат *L* была выбрана средняя позиция недвижимых тумб (IAT3, IAT5, IATA) за 6 дней эксперимента. Из анализа полученных таким образом значений следует, что максимальный интервал вариаций координат в системе *LNEH* недвижимых реперов по горизонтальным компонентам достигает ~ 4 мм, а по вертикали – ~ 9 мм. Такой размах вариаций координат в несколько раз превышает вариации длин базовых линий между недвижимыми пунктами. Теперь сравним заранее известную идеальную модель приращения координат пункта IAT1 с движениями, рассчитанными на основе GPS-измерений относительно статичного пространственного центра *L* (рис. 5). Очевидно, что приращение координат по данным GPS значительно отличается от идеальной модели движения пункта IAT1. При этом, максимальные значения посуточных различий по северной компоненте составляет ~ 2,7 мм, по восточной – ~ 3,7 мм, а по вертикали – ~ 9,1 мм. При такой методике преобразования GPS координат и соответствующем уровне точности можно корректно распознать только общий тренд перемещения репера IAT1 в пространстве. При этом следует вспомнить достаточно устойчивое поведение

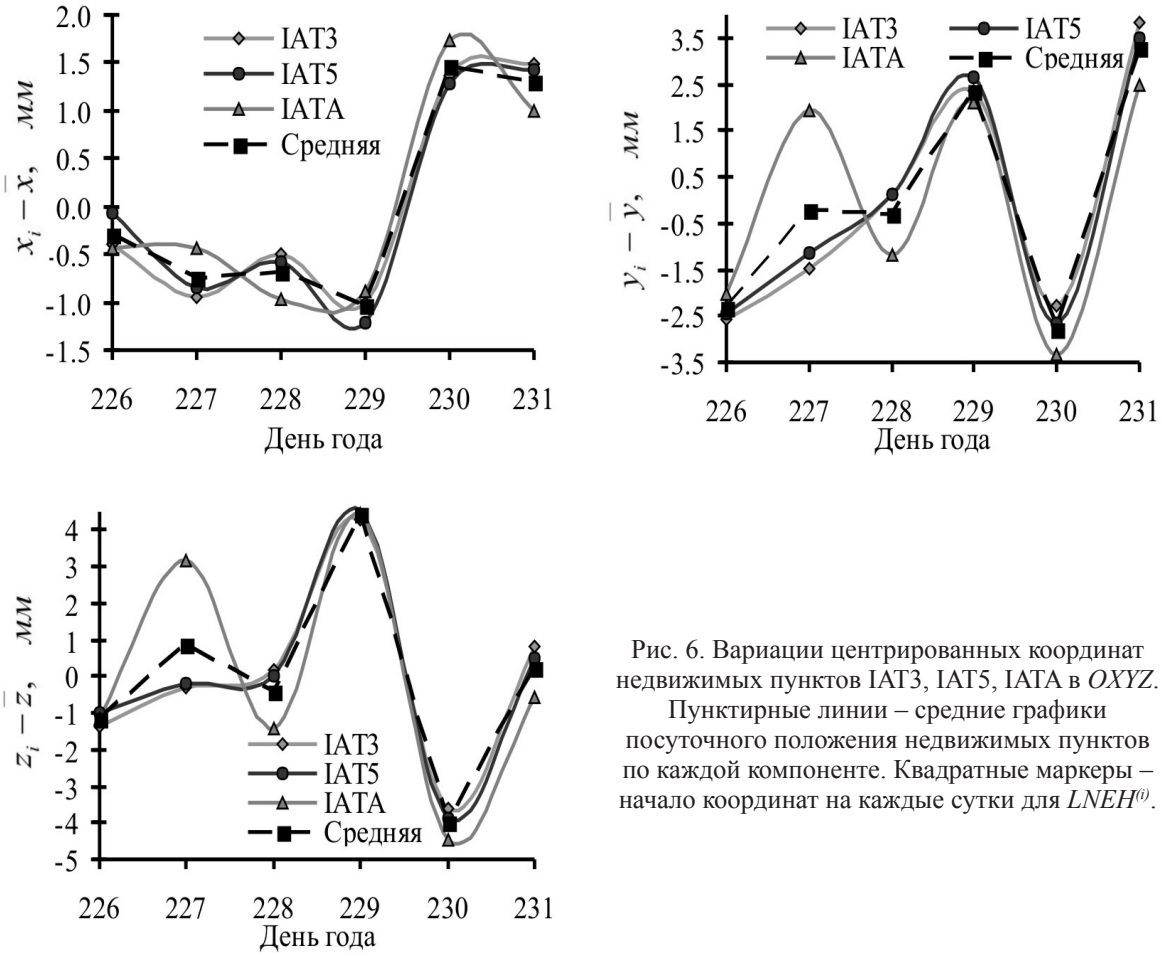


Рис. 6. Вариации центрированных координат недвижимых пунктов IAT3, IAT5, IATA в *OXYZ*. Пунктирные линии – средние графики посуточного положения недвижимых пунктов по каждой компоненте. Квадратные маркеры – начало координат на каждые сутки для $LNEH^{(i)}$.

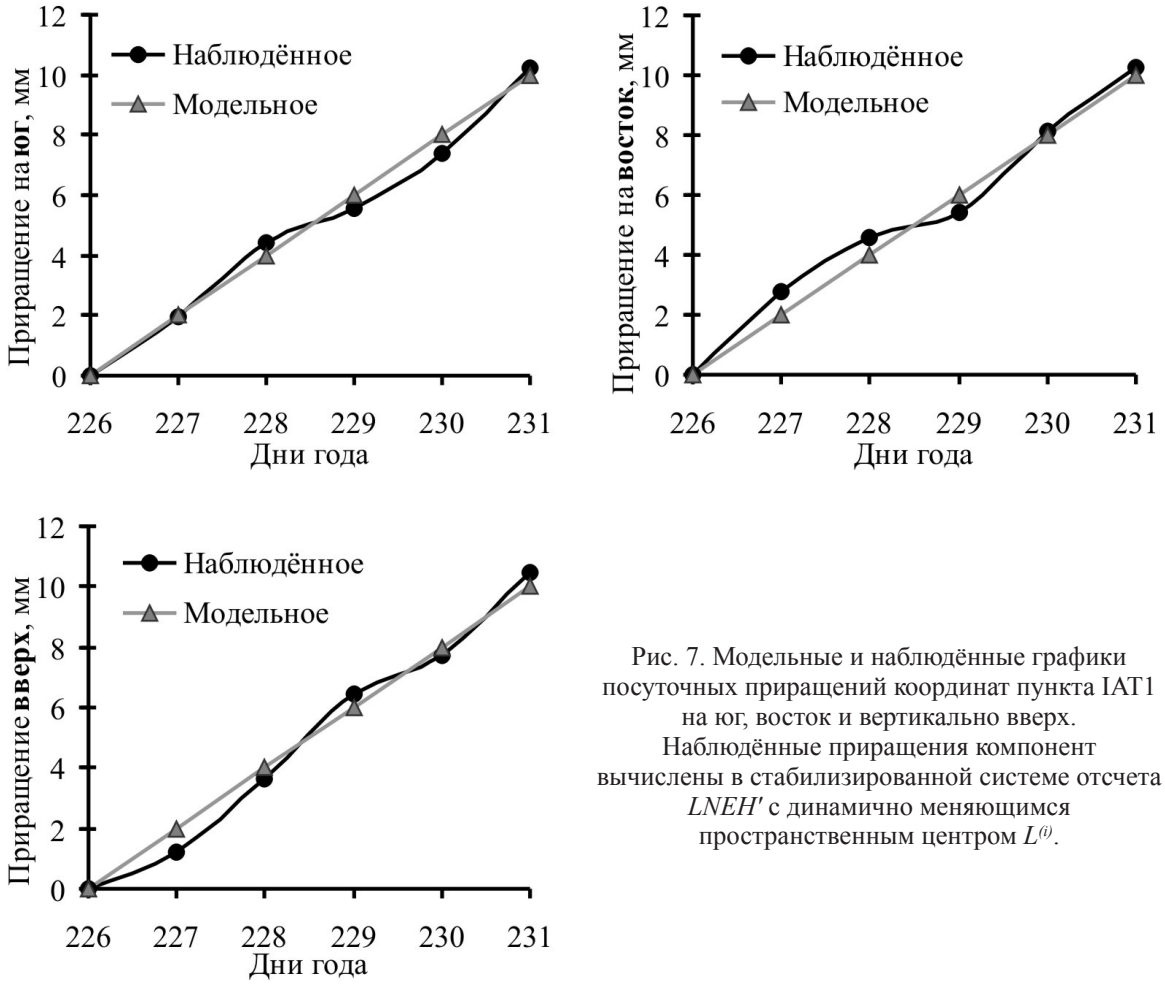


Рис. 7. Модельные и наблюдённые графики посуточных приращений координат пункта IAT1 на юг, восток и вертикально вверх. Наблюдённые приращения компонент вычислены в стабилизированной системе отсчета *LNEH'* с динамично меняющимся пространственным центром $L^{(i)}$.

базовых линий между недвижимыми реперами (IAT3, IAT5, IATA) с размахом вариаций < 1 мм (рис. 3). Рассмотрим детально поведение координат недвижимых в данном эксперименте пунктов (рис. 6).

На рис. 6 видно, что координаты пунктов IAT3 и IAT5 варьируют практически синхронно, от них несколько отличается поведение координат пункта IATA, но между координатами всех трех пунктов наблюдается значительная положительная корреляционная связь. Это может указывать на общий фактор влияния значительно удаленной системы отсчета *OXYZ* при формировании координат для компактно расположенных GPS пунктов.

Второй метод преобразования координат из *OXYZ* в *LNEH* заключается в исключении из локальной системы отсчета *LNEH* общих для недвижимых пунктов (IAT3, IAT5, IATA) вариаций координат в системе *OXYZ*. Была проведена процедура стабилизации координат, опираясь на априорно недвижимые в эксперименте пункты. При этом для каждых суток рассчитывали свое начало локальной системы координат в качестве средней точки между недвижимыми пунктами (рис. 6). Таким образом, совмещая точки $L^{(i)}$ и системы координат $LNEH^{(i)}$, ежесуточно меняющие свое положение в *OXYZ*, получили стабилизированную систему *LNEH'*.

При таком преобразовании в координатах остаются только локальные движения исследуемых пунктов эксперимента и неточности их определения. Если предположить, что площадка Алмалы за время эксперимента не подвергалась деформациям и геодезические тумбы не меняли положение относительно друг друга, то раз-

мах вариаций координат для каждой тумбы даст нам одну из оценок точности. Так, координаты недвижимых реперов (IAT3, IAT5, IATA) максимально изменялись на: ~ 0,4 мм по северной, ~ 0,7 мм по восточной и ~ 4 мм по вертикальной компонентам. Причем, максимальный скачок высотной компоненты в ~ 4 мм наблюдался только в один день для тумбы IATA. Если исключить этот единичный выброс, то размах вариаций вертикальной компоненты для недвижимых реперов станет соизмеримым с их устойчивостью в горизонтальном плане.

Проведем сравнение идеальной модели приращения координат пункта IAT1 с его движениями, рассчитанными на основе GPS данных в стабилизированной системе *LNEH'* с динамично меняющимся пространственным центром $L^{(i)}$ (рис. 7). По сравнению с рис. 5 графики приращений координат по данным GPS наблюдений на рис. 7 существенным образом сблизились с идеальными графиками движения репера IAT1. При этом, максимальные значения посуточных расхождений реальных смещений от движений по GPS данным по северной компоненте составляют ~ 0,62 мм, по восточной – ~ 0,78 мм, а по вертикали – ~ 0,80 мм.

Заключение. Благодаря 3D-корректору удалось получить GPS данные, имитирующие геодинамические движения репера. Оценена фактическая точность определения координат GPS-методом при ежесуточных смещениях геодезического репера по трем компонентам для различных способов преобразования координат. Предложенная методика стабилизации временных рядов, при посуточном осреднении данных, позволила достаточно точно по трем компонентам воспроизвести движения искусственно смещаемого репера и устойчивость априорно неподвижных пунктов. При этом точность определения смещения репера по трем направлениям примерно одинакова и не превышает 1 мм. Пока остается ряд проблем в применении данной процедуры стабилизации GPS координат при решении различных геодинамических задач. На наш взгляд, необходимо продолжать исследовательские работы в этом направлении.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Бакка, который курировал создание 3D-корректора, и осуществил экспериментальные GPS-измерения в полевых условиях.

Литература

1. *Abdrakhmatov K.Ye.,* Aldazhanov S.A., *Hager B.H. et al*. Relatively construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates // Nature. 1996. Vol. 384. P. 450−453.
2. *Зубович А.* Изучение поля скоростей современных движений земной коры Центрального Тянь-Шаня методами космической геодезии: Дисс... канд. физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 95 с.
3. *Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А.* Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // Физика Земли. 2010. № 7. С. 33–51.
4. *Barkalova T.S., Kuzikov S.I.* Variations of coordinates at GPS measurements on Tien Shan // Space Geodynamics and Modeling of the Global Geodynamic Processes, APSG. Novosibirsk: APH “Geo”, 2009. P. 66–71.
5. *Herring T.A., King R.W., McClusky S.C*. GAMIT: GPS Analysis at MIT. DEAPS. Release 10.3. Cambridge: MIT, 2009. 183 p.
6. *Herring T.A., King R.W., McClusky S.C*. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. DEAPS. Release 10.3. Cambridge: MIT, 2009. 91 p.
7. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.