# GPS МОНИТОРИНГ РЕГИОНАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

# Жантаев Ж.Ш., Виляев А.В.

*АО «Национальный центр космических исследований и технологий»* ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан, vilayev@gmail.com

## Введение

В практике геодинамических исследований современных движений земной поверхности (СДЗП) используются долговременные ряды GPS наблюдений. Определение скорости движения земной коры по дискретным наблюдениям на сети постоянно действующих станций стало стандартной операцией. После процедур удаления ошибок и помех из измеряемого сигнала, определяются с высокой точностью координаты GPS станции и компоненты планового и высотного смещений. Линейный тренд временных рядов измерений считается прямым индикатором тектонических движений и деформаций. В то же время большинство временных рядов GPS содержат периодическую (годовую и полугодовую) составляющую с амплитудами соизмеримыми с линейным трендом. Причиной сезонных вариаций могут быть изменения атмосферной нагрузки [10], гидрологическое воздействие уровня подземных вод [11], сезонные температурные эффекты [9], земные приливы, технологические особенности аппаратуры.

Цель работы состояла в изучении периодических вариаций горизонтального движения GPS пунктов как отражения динамики поля напряженно-деформированного состояния (НДС) приповерхностных участков земной коры Северного Тянь-Шаня.

#### Исходные данные и методы исследования

Исходными данными послужили результаты наблюдений на 11 пунктах сети стационарных GPS приемников Института Ионосферы за период 2009-2016 гг. Станции расположены в сейсмически опасной зоне с возможной сотрясаемостью до 9-ти баллов в районе горных хребтов Северного Тянь-Шаня, а также в переходной области к асейсмичной части Казахского щита. Измерения проводились двухфазными GPS приемниками LEICA GPS1200, TRIMBLE 4000SST, ROGUE SNR-8000. Дискретность взятия отсчетов составляла 30 с.

Обработка сигналов осуществлялась программным комплексом GAMIT/GLOBK [7]. Ежедневные решения объединялись с результатами измерений 23 станций опорной GNSS сети в системе координат ITRF2008. В результате получены абсолютные значения координат по долготе, широте и высоте в каждом пункте наблюдений относительно Евразийского континента. Средняя точность определения координат станций составила 0.8 мм в плане и 4.6 мм по высоте. Компоненты смещений и их линейный тренд показаны на примере пункта TURG на рис. 1.

Скорости региональных СДЗП определены как линейные тренды приращений координат станций за период наблюдений. Установлено субмеридиональное движение отдельных блоков земной коры в северном направлении со скоростями 1÷5 мм/год и знакопеременное движение со скоростями до 2 мм/год по модулю для компоненты запад-восток. По вертикали наблюдается поднятие западной части территории с амплитудой 1.2÷4.0 мм/год.

Сезонная декомпозиция осуществлена для соответствующих направлений вычетом из измеренных рядов линейных трендов. Методом наложения эпох выделены периодические (годовые и полугодовые) компоненты смещения по долготе, широте для каждой GPS станции. Вертикальная компонента перемещения не рассматривалась.

Движение пунктов в горизонтальной плоскости аппроксимировано эллипсом. Главные оси аппроксимирующего эллипса определяют скорости сезонных движений по направлениям юг-север и запад-восток. Реальное движение земной поверхности происходит в направление вектора скорости, рассчитываемого суперпозицией глобального (линейного) тренда и векторов периодических (сезонных) вариаций.



Рис. 1. Компоненты смещений GPS пункта TURG (слева) и вектора горизонтальной скорости движения GPS станций, вычисленные по линейному тренду (справа)

Полученные значения скорости движений GPS станций интерполированы к узлам равномерной сетки 10×10 км для вычисления компонент НДС в зависимости от сезона года. Земная кора представлена простейшей моделью сплошной однородной среды. Компоненты скорости смещений в узлах сети интерпретированы как составляющие тензора деформаций в единицу времени. В Гауссовой системе координат для упругой среды в первом приближении параметры деформаций рассчитаны из соотношений [8]:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_{1}, \varepsilon_{2} = \frac{1}{2} \left( (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \pm \left[ \left( \varepsilon_{xy} \right)^{2} + \frac{1}{4} \left( \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\tan \theta = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\left( \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \right) \pm \left[ 4 \left( \varepsilon_{xy} \right)^{2} + \left( \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left( \varepsilon_{1} - \varepsilon_{2} \right)$$

$$\Delta = \varepsilon_{1} + \varepsilon_{2}$$

где *и* и *v* – компоненты скорости по GPS измерениям,  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – линейные деформации по осям координат,  $\varepsilon_{xy}$  – деформация сдвига,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – главные деформации, *γ* – максимальная деформация сдвига,  $\Delta$  – максимальное растяжение-сжатие,  $\theta$  – угол ориентации главных деформаций.

#### Результаты и обсуждение

Установлено ежегодное устойчиво-направленное вращательное движение GPS пунктов в горизонтальной плоскости. На рис. 2 представлены динамика смещения в плане отдельных GPS станций. Амплитуда циклических перемещений, определяемая по главным осям эллипса, изменяется от 2 мм до 4 мм в сезон на фоне систематических трендовых не более 5.3 мм/год. Центр эллипса движется со скоростью и по направлению, определяемым основным линейным трендом GPS пункта. Данный результат получен как для пунктов Северного Тянь-Шаня, так и для некоторых рассмотренных международных станций GNSS (ARTU). Аналогичная сезонная динамика движений наблюдалась также в области Алданского щита и территории Южной Якутии [6, 7].



Рис. 2.Динамика смещений (мм) GPS пунктов KURY, CHLK, IZVS в плане

По результатам GPS измерений выявлено противоположно-направленное движение земной поверхности в зависимости от сезона года – осень-зима или весна-лето (рис. 3). В холодное время года преобладают юго-западные направления горизонтальных смещений, в теплое – северовосточные. Максимальная сезонная амплитуда горизонтальных компонент перемещений достигает 11.5 мм (TURG) на фоне глобальных трендовых не более 5.3 мм/год.



Рис. 3. Динамика вектора горизонтальных смещений GPS пунктов (масштаб относительный для лучшей визуализации)

Динамика горизонтальных смещений складывается под влиянием общепланетарной атмосферной циркуляции и орографических особенностей подстилающей поверхности. Планетарная циркуляция, преимущественно меридионального направления, обуславливает интенсивный периодический привнос-вынос или холодных арктических масс с севера, или теплых воздушных масс с юга.

В зимний период (50-60% времени) территория находится под преимущественным влиянием мощного западного отрога сибирского антициклона [2]. Средние многолетние значения атмосферного давления зимних месяцев антициклона составляют в центре примерно 1034 мбар.

В летний период характерно формирование сильно прогретой однородной воздушной массы с тропическими термопараметрами. В барическом поле устанавливаются условия пониженного давления, которое создается благодаря интенсивному прогреванию подстилающей поверхности и связанному с этим повышению температуры воздуха нижних слоев атмосферы. Средние значения атмосферного давления летних месяцев составляют около 927 мбар по данным метеостанций Алматинской области [4].

Орографическое влияние горных массивов на атмосферные фронты проявляется в изменении направления и интенсивности воздушных течений, а также в сезонных изменениях режима барических центров нижней половины тропосферы. Тормозящее влияние гор (до 4÷7 км н.у.м.) создает условия для динамического роста давления с севера и запада. Хребты Джунгарского, Заилийского, Таласского и Киргизского Алатау, ориентированные в основном с запада на восток, представляют собой естественный барьер, препятствующий свободному проникновению холодных воздушных масс на юг. Фронты, приближающиеся с севера (преимущественно холодные), замедляют свое движение или стационируют [2].

Процессы планетарной атмосферной циркуляции, при условии преобладания их в течение длительных промежутков времени, коренным образом влияют на формирование вариаций геодинамического режима подстилающей земной поверхности. Иллюстрацией влияния атмосферной циркуляции могут служить составленные схемы горизонтальных скоростей СДЗП (рис. 4).



Рис. 4 Схематические карты периодических вариаций скоростей горизонтального движения земной поверхности Северного Тянь-Шаня (мм/год). (А - региональный тренд, В - весенне-летний период, С - осенне-зимний период)

Значительное перераспределение поля горизонтальных скоростей в сравнении с построениями по линейному тренду происходит в случае учета периодических (сезонных) движений. В целом сохраняется амплитуда значений и структура поля скоростей – стабильная область на северо-западе против активной – юго-восточной. В кинематике сезонных вариаций движений наблюдается дифференциация в центральной области с относительной повышенной аномалией скорости в весенне-летний период (рис. 4В) и стабильной частью территории субширотного простирания в осенне-зимний период (рис. 4С). Годичный перепад сезонных скоростей достигает 8 мм/год.



Рис. 5. Динамика сезонных вариаций главных деформаций земной поверхности Северного Тянь-Шаня. Деформации одноосного сжатия: 1 – глобальный тренд, 2 – весна-лето, 3 – зима-осень; деформации одноосного растяжения: 4 – глобальный тренд, 5 – весна-лето, 6 – зима-осень (стрелки – направления сжатия-растяжения)

Скорости смещений GPS пунктов фактически содержат информацию о распределении НДС земной коры. Неравномерное движение блоков приводит к накоплению деформаций. Напряженнодеформированное состояние территории обусловлено смятием и поперечным (латеральным) сокращением земной коры Тянь-Шаня вследствие движения Индийской плиты в направлении Евразийской в область южных границ стабильного Казахского щита (рис. 5.1). Меридиональное сокращение сопровождается растягивающими деформациями (рис. 5.4), которые обеспечивают или удлинение этих зон по простиранию или массоперенос горной среды по вертикали, тем самым компенсируя поперечное сокращение коры [3].

Характеристикой горизонтальных деформаций максимального сжатия, рассчитанных по линейному тренду скоростей движения тренда, является наличие области одноосных сжимающих напряжений субширотного простирания, которые вызывают деформационное укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север до  $30 \cdot 10^{-9}$  (рис. 5.1). Подобная сейсмотектоническая обстановка характерна для районов Центрального и Южного Тянь-Шаня, где большая часть землетрясений также происходит в условиях субмеридионального сжатия [1].

На фоне продолжительных региональных движений периодические вариации смещений, регистрируемые на GPS пунктах, коренным образом изменяют амплитуду деформаций одноосного расширения в отдельных областях до амплитуд -85·10<sup>-9</sup> (рис. 5.5, 5.6). При этом субширотная ориентация оси сжатия сохраняется (рис. 5.2, 5.3).

## Заключение

Суперпозиция скоростей линейного тренда и скоростей периодических (сезонных) движений, вычисленных по данным GPS мониторинга, фактически отражает реальный процесс движений земной поверхности. Региональная кинематика обусловлена направленным смещением Индийской плиты в направлении Евразийского континента в область сочленения с южными границами стабильного Казахского щита. Динамика периодических горизонтальных смещений складывается под влиянием общепланетарной атмосферной циркуляции и орографического строения.

Изменения напряженно-деформированного состояния верхних горизонтов земной коры находят отражение в вариациях скорости движения поверхности. Динамика деформационного процесса, прослеживаемая по периодическим вариациям горизонтальных движений, может служить основой для разработки предиктора формирования очага возможного землетрясения.

#### Список литературы

1. Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д. и др. Поле деформаций, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1634-1640.

2. Климат Казахстана / Под ред. Утешева А.С. Казгидромет. Ленинград, 1959. 371 с.

3. *Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С.* Тектоническое поле современных напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. Вып. 1. С. 257–290.

4. Справочник по климату Казахстана. Многолетние данные. Раздел 5. Ветер. Раздел 6. Атмосферное давление. / Информационно-аналитический центр «РФГЗ» Выпуск I-XIV. Алматы, 2005. 336 с.

5. Трофименко С.В., Гриб Н.Н. Годичная динамика движения GPS пункта «Нерюнгри» // Современная геодинамика Центральной Азии. Иркутск. 2012. С. 189-192.

6. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Колодезников И.И., Маршалов А.Я. Инерционная модель взаимодействия блоков земной коры по данным GPS-геодезии // Фундаментальные исследования. Геологоминералогические науки. 2013. № 6. С. 111-115.

7. Herring T.A, King R. W., Mc Clusky S. C. Gamit: GPS Analysis at MIT. Version 10.4 / Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2010 A. 162 p.

8. Jaeger J.C., Cook N.G. Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed. / Blackwell Publishing, 2007. 489 p.

9. Romagnoli C., Zerbini S., Lago L., Richter B., Simon D., Domenichini F., Elmi C., Ghirotti M. Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations // J. Geodyn. 2003. V. 35 (4–5). P. 521–539.

10. Van Dam T.M., Wahr J., Chao Y., Leuliette E. Predictions of crustal deformation and of geoid and sea-level variability caused by oceanic and atmospheric loading // Geophys J. 1997. V. 129. P. 507–517.

11. Van Dam T., Wahr J., Milly P.C.D., Shmakin A.B., Blewitt G., Lavalle D., Larson K.M. Crustal displacements due to continental water loading // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 651–654.