

## О ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ПО GPS НАБЛЮДЕНИЯМ

*Ж. Ш. Жантаев, А. В. Виляев*

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»  
ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан

Рассматривается динамика движения GPS станций на территории Алматинского прогностического полигона в сейсмоактивном регионе Северного Тянь-Шаня по результатам мониторинга за период 2009–2018 гг. Скорости смещений поверхности определены суперпозицией соответствующих компонент векторов скоростей линейного тренда и векторов скоростей сезонных (периодических) смещений и интерпретированы как составляющие тензора деформаций. Земная кора аппроксимирована простейшей моделью сплошной однородной среды. Рассчитаны деформации и напряжения по уравнениям механики деформируемого тела без учета факторов времени и температуры, т. е. соответствующие закону Гука. По распределению максимальных деформаций сжатия-расширения земной коры с учетом сезонных вариаций установлено, что эпицентры сильнейших землетрясений пространственно совпадают с градиентами вариаций данного параметра и приурочены к областям с амплитудами наибольшего растяжения. Эпицентры сильных землетрясений в плане сопряжены с величинами деформаций понижающих сдвиговую прочность пород и контролируются значениями сдвиговых деформаций не более  $15 \cdot 10^{-9}$ .

### Введение

Проведение GPS-измерений в Тянь-Шанском регионе началось в 1992 г. с создания двух наблюдательных сетей. Инициаторами выступили ученые из Потсдамского центра исследования Земли (К. Райгбер), Научной станции и Опытно-методической электромагнитной экспедиции ОИВТ РАН (Ю. А. Трапезников), Института геоэкологии РАН (В. И. Макаров), Института астрономии РАН (С. К. Татевян). В работе также принимали участие специалисты Института физики Земли РАН, Института геологических наук и Института сейсмологии МОН Казахстана, Института сейсмологии и Института геологии НАН Киргизстана, Института сейсмологии и Института астрономии НАН Узбекистана, а также геодезические службы этих республик.

В настоящее время для сейсмоактивной территории Северного Тянь-Шаня накоплены данные исследований современных движений методами космической геодезии [Зубович и др., 2001; Курсеев, 2011; Жантаев и др., 2013; Надиров и др., 2014]. Начиная с 2009 г., ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ» совместно с Институтом сейсмологии МОН РК проводит GPS мониторинг движений земной поверхности на территории Алматинского прогностического полигона. В работе отражены результаты исследования вариаций движения поверхности методами спутниковой геодезии применительно к изучению динамики деформационных процессов земной коры.

### Исходные данные

Использованы измерения десяти непрерывно действующих GPS станций за период 2009–2018 гг. На рис. 1 представлено расположение станций в девятибальной сейсмически опасной зоне 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 и ROGUE SNR-8000. Дискретность взятия отсчетов составляла 30 с. Обработка сигналов осуществлялась программным комплексом GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2010a,b]. Ежедневные решения объединялись с результатами измерений 23 станций мировой GNSS сети в референцной системе *igs14\_comb*. В результате получены временные ряды абсолютных значений координат по долготе, широте и высоте для каждого пункта наблюдений. После процедур удаления ошибок и помех из измеряемого сигнала средняя точность определения координат станций составила 0.6 мм в плане и 4.6 мм по вертикали.

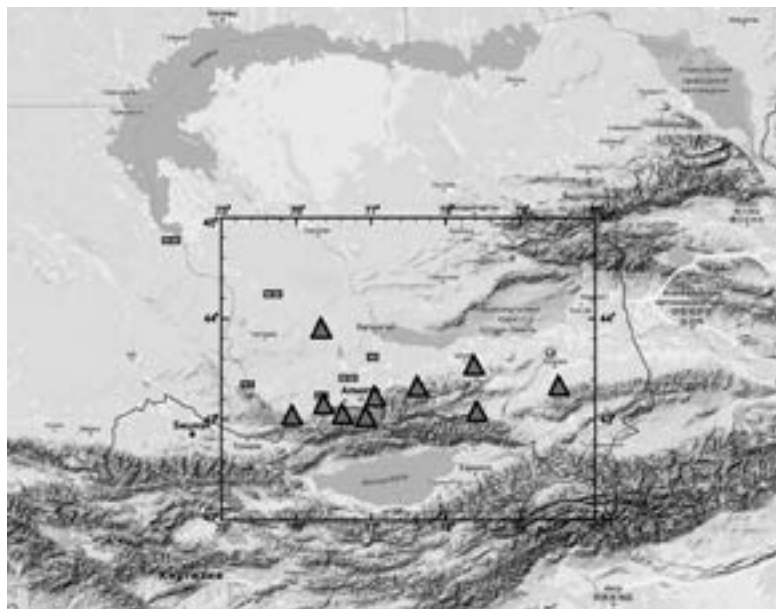


Рис. 1. Размещение GPS станций Алматинского прогностического полигона

### Методы исследования

Линейный тренд временных рядов координат GPS станций считается прямым индикатором тектонических движений и деформаций. В то же время вариации положения станций содержат периодическую (годовую и полугодовую) составляющую с амплитудами, соизмеримыми с линейным трендом. Причиной сезонных вариаций могут быть изменения атмосферной нагрузки [Van Dam et al., 1997], гидрологическое воздействие уровня подземных вод [Van Dam et al., 2001], сезонные температурные эффекты [Romagnoli et al., 2003], земные приливы, технологические особен-

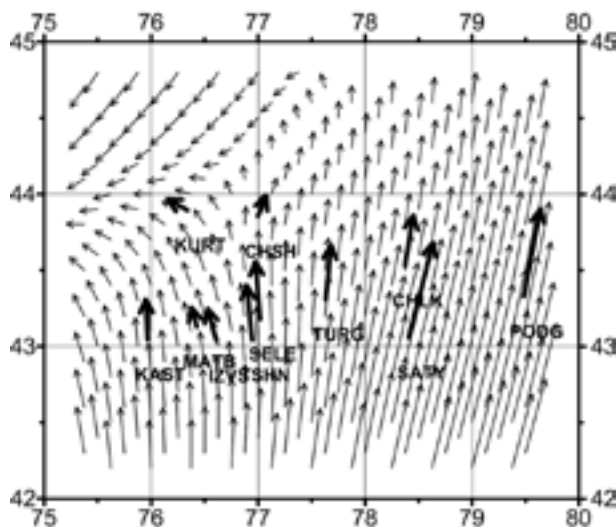


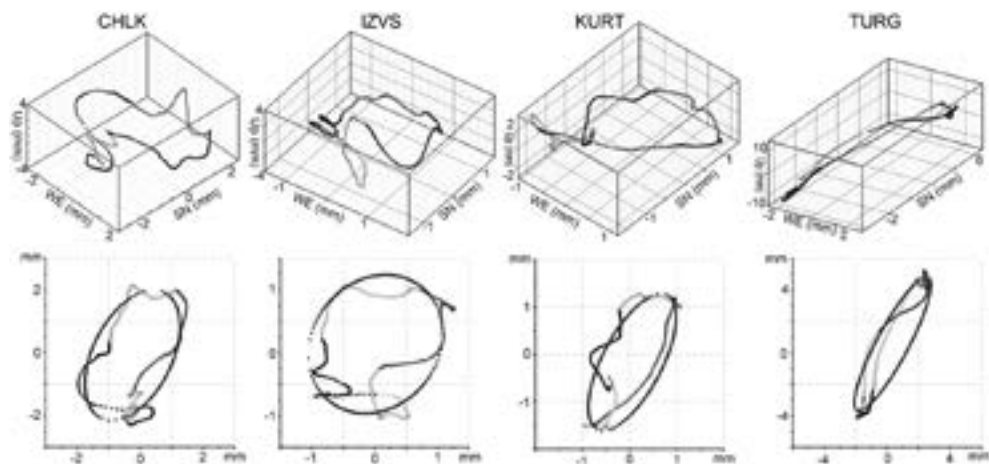
Рис. 2. Карта векторов горизонтальной скорости региональных движений земной коры

ности аппаратуры. Комплексное воздействие указанных факторов обуславливает высокочастотные, сравнительно с региональными, локальные деформационные процессы верхних горизонтов земной коры.

В нашей работе компоненты скорости низкочастотных (региональных) движений стандартно определены как линейный тренд приращений координат станций к продолжительности наблюдений. На рис. 2 представлены карта векторов горизонтальной составляющей региональной скорости движения земной поверхности территории Северного Тянь-Шаня. Построение выполнено в пределах координат  $N42^{\circ}\div45^{\circ}$  и  $E75^{\circ}\div80^{\circ}$ . Отмечается субмеридиональное движение земной коры в северном направлении со скоростями  $4\div5$  мм/год и смена направления на западное с уменьшением амплитуд скоростей до 1 мм/год в области геодинамически стабильной Казахской платформы на северо-западе. В вертикальном направлении наблюдается поднятие западной части территории с амплитудой  $1.2\div4.0$  мм/год.

Вычитанием линейных трендов из временных рядов для соответствующих направлений горизонтальных движений определены значения высокочастотных (сезонных) смещений по долготе и широте для каждой GPS станции. Далее методом наложения эпох выделены смещения центров приемных антенн на каждый день года. По результатам установлено ежегодное устойчиво-направленное вращательное движение пунктов в горизонтальной плоскости. Затем годичное движение пунктов в горизонтальной плоскости аппроксимировалось эллипсами, как показано для отдельных станций на рис. 3. Алгоритм выделения сезонных вариаций движений в GPS наблюдениях описан в [Виляев и др., 2016].

Для разных станций амплитуда циклических перемещений, определяемая по главным осям эллипса, изменяется от 2 до 4 мм за полугодие на фоне систематических трендовых не более 5.3 мм за год. Процесс смещения GPS пункта определяется региональным линейным трендом и годичными (сезонными) перемещениями. Главные оси аппроксимирующих эллипсов определяют вектор скорости сезонных



**Рис. 3.** Динамика годовых движений центров антенн GPS станций: сверху — движение центра в пространстве; внизу — аппроксимирующий эллипс горизонтальных смещений

движений по направлениям. Вертикальная компонента перемещения нами не рассматривалась в связи с неопределенной природой данных дислокаций.

Данный результат получен нами как для станций Северного Тянь-Шаня, так и для некоторых рассмотренных международных GNSS станций. Аналогичная цикличность движений была описана [Трофименко и др., 2013] в области Алданского щита и территории Южной Якутии [Трофименко, Гриб, 2012]. В работе [Dong et al., 2002] рассмотрены 4.5-летние временные ряды 43 GPS станций, расположенных по всему земному шару. Методом «пиринга» выделены сезонные колебания в изменении центра позиционирования от воздействия атмосферной нагрузки в интервале  $1.4 \div 1.8$  мм. Можно предположить, что сезонные эффекты имеют планетарный характер.

Нами для рассматриваемой области Северного Тянь-Шаня выделено противоположно-направленное движение земной поверхности в зависимости от сезона года — осень–зима или весна–лето. В холодное время года преобладают юго-западные направления горизонтальных смещений, в теплое — северо-восточные. Максимальная сезонная амплитуда горизонтальных компонент перемещений достигает 11.5 мм на фоне региональных линейных не более 5.3 мм/год.

Реальное движение земной поверхности происходит в направлении вектора скорости, рассчитываемого суперпозицией глобального (линейного) тренда и векторов периодических (сезонных) смещений, как показано на рис. 4. Совместный учет региональных и годовых движений имеет принципиальное значение для изучения динамики вариаций деформационных процессов.

Для вычисления компонент поля деформаций с учетом годичной цикличности земная кора была представлена простейшей моделью сплошной однородной среды. Значения скорости реальных движений GPS станций интерполированы к узлам равномерной сетки  $10 \times 10$  км и интерпретированы как составляющие тензора деформаций в единицу времени.

В Гауссовой системе координат для упругой среды в первом приближении параметры деформаций рассчитывались из соотношений [Jaeger et al., 2007]:

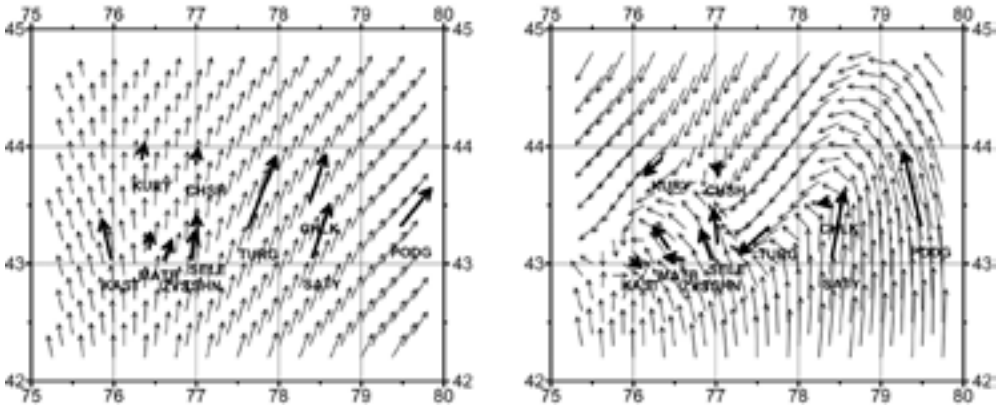


Рис. 4. Карта векторов горизонтальной скорости движения, вычисленных суперпозицией линейного тренда и годовых смещений: слева — период «весна–лето»; справа — период «зима–осень»

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}; \\ \varepsilon_1, \varepsilon_2 &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \pm \left[ (\varepsilon_{xy})^2 + \frac{1}{4} (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 \right]^{1/2}; \\ \tan \theta &= \frac{2\varepsilon_{xy}}{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) \pm \left[ 4(\varepsilon_{xy})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 \right]^{1/2}}; \\ \gamma &= \frac{1}{2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2); \\ \Delta &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $u$  и  $v$  — компоненты скорости по GPS измерениям;  $\varepsilon_{xx}$  и  $\varepsilon_{yy}$  — линейные деформации по осям координат;  $\varepsilon_{xy}$  — деформация сдвига;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — главные деформации;  $\gamma$  — максимальная деформация сдвига;  $\Delta$  — максимальное растяжение-сжатие;  $\theta$  — угол ориентации главных деформаций.

### Результаты и обсуждение

Формирование напряженно-деформированного состояния и сейсмичности земной коры Северного Тянь-Шаня обусловлено движением Индийской плиты в направлении Евразийской в область южных границ стабильной Казахской платформы. Взаимодействие этих плит определяет, главным образом, величину накопленной энергии и степень подготовки геологической среды региона к активным тектоническим движениям.

В то же время динамика горизонтальных движений складывается под влиянием общепланетарной атмосферной циркуляции и орографических особенностей подстилающей поверхности. Планетарная атмосферная циркуляция юго-восточной час-

ти Казахстана, преимущественно меридионального направления, обуславливает интенсивный периодический привнос-вынос или холодных арктических масс с севера, или теплых воздушных масс с юга.

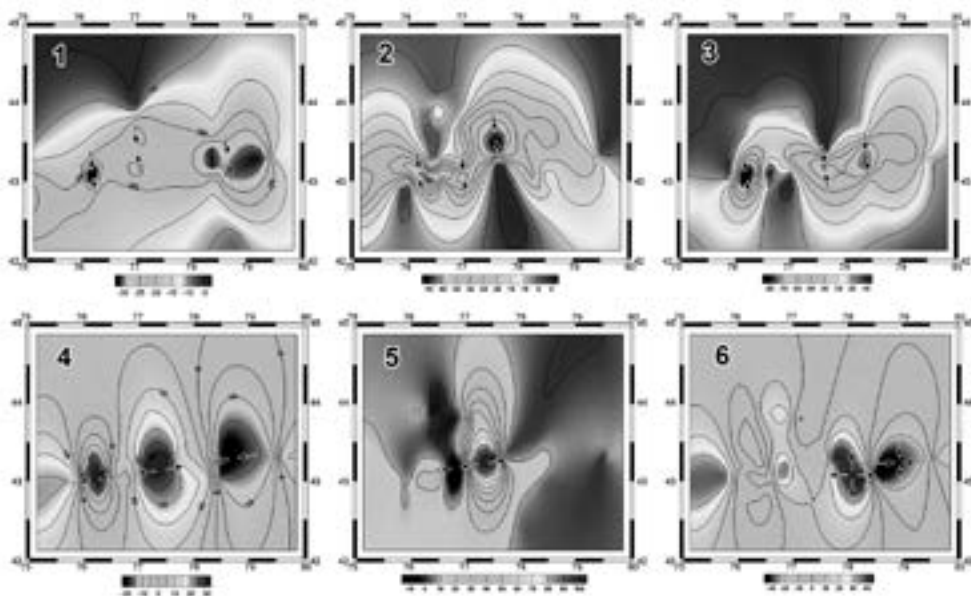
В зимний период (50%–60% времени) территория находится под преимущественным влиянием мощного западного отрога сибирского антициклона [Климат Казахстана, 1959]. Средние многолетние значения атмосферного давления зимних месяцев антициклона составляют в центре примерно 1034 мбар. В летний период характерно формирование сильно прогретой однородной воздушной массы с тропическими термопараметрами. В барическом поле устанавливаются условия пониженного давления вследствие интенсивного прогрева подстилающей поверхности и повышения температуры воздуха нижних слоев атмосферы. Средние значения атмосферного давления летних месяцев составляют около 927 мбар по данным метеостанций Алматинской области [Справочник по климату Казахстана, 2005].

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  $4\div 7$  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 стационарируют [Климат Казахстана, 1959].

Процессы планетарной атмосферной циркуляции при условии преобладания их в течение длительных промежутков времени коренным образом влияют на формирование вариаций геодинамического режима подстилающей земной поверхности. Данный фактор может служить триггерным механизмом возникновения землетрясений и частичного высвобождения накопленной энергии. Иллюстрацией влияния атмосферной циркуляции служат составленные схемы векторов горизонтальных скоростей движений GPS станций, представленные на рис. 4. В случае учета периодических (сезонных) движений в целом сохраняется амплитуда значений и структура поля скоростей в южной области, перекрытой от влияния барических масс горными хребтами Северного Тянь-Шаня. В осенне-зимний период в сезонной кинематике происходит смена направления смещений в северо-западной и центральной областях, более подверженных воздействию холодных фронтов Сибирского антициклона. Годичный перепад скоростей достигает 8 мм/год.

На рис. 5 представлено поле деформаций максимального сжатия, рассчитанных по линейному тренду. Деформации характеризуются наличием одноосных сжимающих напряжений субширотного простираения, которые вызывают деформационное укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север до  $30\cdot 10^{-9}$  (рис. 5.1). Подобная сеймотектоническая обстановка характерна для районов Центрального и Южного Тянь-Шаня, где большая часть землетрясений также происходит в условиях субмеридионального сжатия [Зубович и др., 2001]. Меридиональное сокращение земной коры Тянь-Шаня сопровождается растягивающими деформациями (рис. 5.4), которые обеспечивают или удлинение этих зон по простираанию, или массоперенос горной среды по вертикали, тем самым компенсируя поперечное сокращение коры [Ребецкий, Алексеев, 2014]. Отметим соответствие





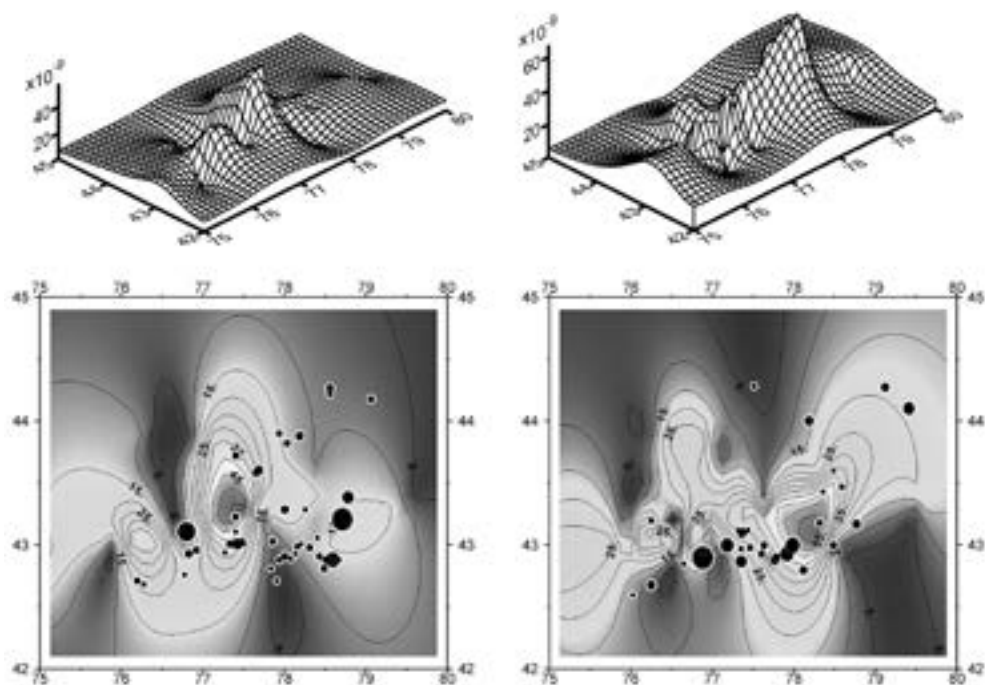
**Рис. 5.** Динамика сезонных вариаций главных деформаций земной поверхности Северного Тянь-Шаня. деформации одноосного сжатия: 1 — региональный тренд, 2 — весна–лето, 3 — зима–осень; деформации одноосного растяжения: 4 — региональный тренд, 5 — весна–лето, 6 — зима–осень (стрелки — направления сжатия-растяжения)

величин оценок деформаций по данным механизмов очагов землетрясений и GPS измерениям.

На фоне региональных движений годовичные вариации смещений, регистрируемые на GPS пунктах, отражают изменение амплитуд деформаций одноосного расширения отдельных областей в два и более раз (рис. 5.5 и 5.6). При этом субширотная ориентация оси сжатия сохраняется (рис. 5.2 и 5.3).

С целью сравнения влияния вариаций поля деформаций на сейсмичность в зависимости от сезона года была сделана выборка землетрясений из каталога СОМЭ МОН РК в указанном квадрате координат за все время инструментальных наблюдений. В выборку вошли землетрясения магнитудой MLH от 4.5 и более. Всего на территории произошло 62 землетрясения в весенне-летний период и 84 землетрясения в осенне-зимний. На рис. 6 представлено сравнение положения эпицентров с распределением максимальных значений деформаций сдвига, рассчитанных по (1).

В поле максимальных деформаций эпицентры сильнейших землетрясений (Верненское 1887 г.,  $M = 7.3$ ; Чиликское 1889 г.,  $M = 8.3$ ; Кеминское 1911 г.,  $M = 8.2$ ) контролируются граничной областью минимальных значений сдвиговых деформаций до  $15 \cdot 10^{-9}$  и приурочены, в основном, к максимальным градиентам изменения данного параметра. Характер дислокаций эпицентров сопряжен с накоплением деформаций, понижающих сдвиговую прочность пород, — зонами разгрузки напряжений, а не с зонами накопления сжимающих напряжений, причем независимо от сезона года. При этом деформирование земной коры и сейсмичность являются проявлениями единого геодинамического циклического процесса.



**Рис. 6.** Максимальные деформации сдвига и эпицентры землетрясений: сверху — 3D поверхность, слева — период «весна–лето»; справа — «зима–осень»

### 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.

Вариации скорости движения поверхности с учетом региональной и локальной (годовой) кинематики отражают изменения напряженно-деформированного состояния верхних горизонтов земной коры. Тем самым мониторинг деформационных процессов земной коры может быть осуществлен по GPS наблюдениям.

### Литература

Вияев А. В., Жантаев Ж. Ш., Стихарный А. П. Динамика сезонных движений GPS станций на территории Северного Тянь-Шаня // Известия НАН РК: Серия физико-математическая, 2016. № 4 (308). С. 34–39.

Жантаев Ж. Ш., Вияев А. В., Бибосинов А., Садыков К. А., Асанкулов Н. А. Изучение современных медленных движений земной поверхности Казахстана по данным гло-



бальных навигационных спутниковых систем (GNSS) // Прикладные космические исследования в Казахстане, 2013. Т. 9. С. 94–105.

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.

Климат Казахстана / Под ред. А. С. Утешева. — Л.: Казгидромет, 1959. 371 с.

Курскеев А. К. Современная геодинамика Тянь-Шаня по данным космической геодезии // Известия НАН РК: Серия геологии и технических наук, 2011. № 2. С. 5–17.

Надиоров Н. К., Курскеев А. К., Жантаев Ж. Ш. Дифференцированный отклик структур Тянь-Шаня на воздействие космических сил как основа современных геодинамических и сейсмических процессов в литосфере // Известия НАН РК: Серия геологии и технических наук, 2014. № 2. С. 56–69.

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.

Справочник по климату Казахстана. Многолетние данные. Раздел 5. Ветер. Раздел 6. Атмосферное давление. — Алматы: Информационно-аналитический центр «РФГЗ», 2005. Вып. I–XIV. 336 с.

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

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

Dong D., Fang P., Bock Y., Cheng M., Miyazaki S. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series // J. Geophys. Res., 2002. Vol. 107. (B4). P. 91–98.

Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of rock mechanics. — 4th ed. — Blackwell Publishing, 2007. 489 p.

Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GAMIT GPS Analysis at MIT Version 10.4. — Cambridge: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 2010a. 162 p.

Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.4. — Cambridge: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 2010b. 95 p.

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. Vol. 35. No. 4–5. P. 521–539.

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. Int. 129. P. 507–517.

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