

СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ И ПОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

А.Д. Костюк – мл. науч. сотр.

T. Sagiya – researcher

А.В. Зубович – канд. физ.-мат. наук

The relationship between seismicity and crust deformation in the northern Tien Shan have been represented. To estimate strain field from GPS measurements, we used software which base on method by Shen. Results show strain field is heterogeneous and has high level along high seismicity area. Loading condition in high seismicity zones are discussed.

Введение. Северный Тянь-Шань находится в зоне интенсивных современных деформаций с высоким уровнем сейсмичности. Наличие в данном регионе с 1991 г. цифровой сейсмосети KNET и регулярно проводимых с 1992 г. GPS-измерений (Global Positioning System) позволяет провести сравнение распределения сейсмичности с результатами GPS-измерений. Наблюдения GPS позволяют оценить деформации на земной поверхности, сейсмические же данные отражают процессы внутри коры. В данной работе предпринята попытка сопоставить результаты измерений этих двух инструментальных методов. Аналогичные работы уже проводились для территории Тянь-Шаня. Была обнаружена значительная корреляция области максимального горизонтального сжатия с пространственным распределением землетрясений [1]. В данном случае выполняется аналогичное сравнение, но с использованием отличных от прежних методик расчета деформаций и уточненных положений эпицентров землетрясений. Увеличился и объем исходных данных, включенных в расчеты.

Метод и исходные данные. Существуют различные методики расчета деформаций. Так, в работе [1] дилатация вычислялась как:

$$\Delta = \left(\frac{dV_x}{dX} + \frac{dV_y}{dY} \right) / 2. \quad (1)$$

Величины $\frac{dV_x}{dX}$ и $\frac{dV_y}{dY}$ – среднегодовые приращения нормальных деформаций, определяемые как изменения длин между соседними точками вдоль широтного и меридионального направлений соответственно, деленные на расстояния между ними по этим же направлениям за год. Предварительно была выполнена интерполяция поля скоростей на равномерную сетку с шагом 15x15 км и его сглаживание. В этом расчете использовались данные за 1992–1999 гг. по тем пунктам GPS-наблюдений, у которых ошибка определения скорости не превышала 2 мм/год. Векторы скоростей были вычислены с помощью комплекса программ GAMIT/GLOBK. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня вычислялась и в работе [2], расчет был осуществлен по известной методике [3, 4]. Суть метода заключается в том, что по данным о скоростях деформаций трех непараллельных линий p , q и r , имеющих с осью координат соответствующие углы $(\varphi_p, \varphi_q, \varphi_r)$, составляется система уравнений вида:

$$\begin{aligned}
 & (1 + \cos 2\varphi_p) e_{xx} + (1 - \cos 2\varphi_p) e_{yy} + \\
 & + (\sin 2\varphi_p) e_{xy} = 2e_p \\
 & (1 + \cos 2\varphi_q) e_{xx} + (1 - \cos 2\varphi_q) e_{yy} + \\
 & + (\sin 2\varphi_q) e_{xy} = 2e_q \\
 & (1 + \cos 2\varphi_r) e_{xx} + (1 - \cos 2\varphi_r) e_{yy} + \\
 & + (\sin 2\varphi_r) e_{xy} = 2e_r
 \end{aligned} \quad (2)$$

решение которой позволяет определить неизвестные e_{xx}, e_{xy}, e_{yy} – компоненты тензора скорости деформации. Главные значения деформации вычисляются как:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \frac{1}{2} \left[(e_{xx} + e_{yy}) + \sqrt{e_{xy}^2 + (e_{xx} - e_{yy})^2} \right] \\
 E_2 &= \frac{1}{2} \left[(e_{xx} + e_{yy}) - \sqrt{e_{xy}^2 + (e_{xx} - e_{yy})^2} \right]
 \end{aligned} \quad (3)$$

где E_1 – максимальное растяжение; E_2 – минимальное растяжение. Максимальная деформация сдвига определяется из

$$\gamma_{\max} = \sqrt{e_{xy}^2 + (e_{xx} - e_{yy})^2}. \quad (4)$$

При расчете в работе [2] регион был разделен на элементарные площадки размером $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ с шагом 0.25° . В пределах каждой элементарной площадки выделялись три пункта наблюдения GPS, составляющие наибольшую площадь в ячейке. Если площадка содержала только одну или две точки регистрации, то площадь увеличивалась к северу и востоку в два раза.

В настоящей работе для определения поля скорости деформации по данным GPS-наблюдений использовалась программа, разработанная Т. Сагия (Sagiya) и основанная на методе Шена (Shen) [5,6]. В этом методе компоненты горизонтальной скорости смещения (u, v) , компоненты тензора деформации (e_{xx}, e_{xy}, e_{yy}) и скорость вращения ω в произвольной точке с координатами (x_i, y_i) связаны со скоростью смещения (U, V) в точке наблюдения (X, Y) следующим образом:

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & 0 & \Delta y_i \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & -\Delta x_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ e_{xx} \\ e_{xy} \\ e_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x^i \\ \varepsilon_y^i \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x^i &= \sigma_x^i \exp(\Delta x_i^2 / 2D^2), \\
 \varepsilon_y^i &= \sigma_y^i \exp(\Delta y_i^2 / 2D^2),
 \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta x_i = X - x_i$; $\Delta y_i = Y - y_i$; σ_x^i – ошибка измерения компоненты X скорости смещения; σ_y^i – ошибка измерения компоненты Y скорости смещения; D – параметр, контролирующий вес измерения (Distance Decaying Constant, DDC). Значение DDC зависит от сети точек наблюдений, скорости смещения и тектонических особенностей региона. Скорость дилатации и скорость деформации сдвига в каждой точке вычисляются как:

$$\Delta = e_{xx} + e_{yy} \quad (7)$$

$$\Sigma = \sqrt{e_{xy}^2 + (e_{xx} - e_{yy})^2} / 4. \quad (8)$$

При расчете регион был покрыт виртуальной сеткой точек с шагом 0.005° . При вычислении компонент скорости деформации, компонент горизонтальной скорости смещения и скорости вращения в i -ой точке используются данные векторов всех соседних точек, расположенных в радиусе $2D$ от нее. В данном случае параметр D составлял 25 км. При этом ε_x^i и ε_y^i играют роль весовых коэффициентов при решении системы уравнений, построенной согласно (5). Чем дальше от текущей точки находится пункт GPS-измерения и чем больше ошибка измерения скорости в нем, тем меньшее влияние он оказывает на решение системы уравнений для данной точки. Исходные данные представляли собой поле векторов скоростей (рис. 1), полученных по данным GPS за интервал времени с 1995 по 2005 гг. [7]. Их обработка осуществлялась на Научной станции Российской академии наук в г. Бишкек (ИС РАН) комплексом программ GAMIT/ GLOBK Массачусетского технологического института США. В расчетах, кроме пунктов, измеряемых раз в год,

использовались также 9 постоянно действующих станций ИС РАН, работающих в непрерывном круглосуточном режиме, и несколько станций мировой IGS (International

GPS Service for Geodynamics) сети, расположенных в смежных регионах.

Другим существенным отличием метода Шена от методики [4] является одновременное определение, помимо компонент скорости де-

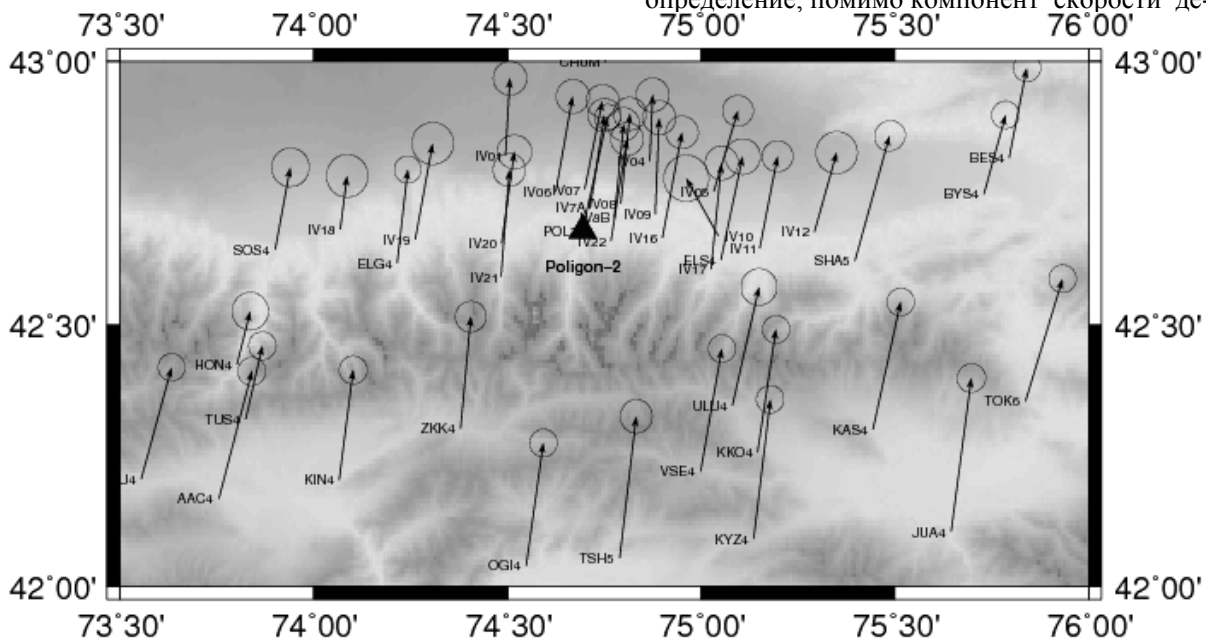


Рис. 1. Поле GPS-векторов, используемых для расчета деформаций. Черный треугольник – точка, относительно которой вычислены векторы.

формации, других кинематических характеристик: горизонтальной скорости смещения и скорости вращения точек сетки. Это позволяет не только упростить расчеты, но и помочь в проверке валидности исходных данных. Так, например, программа расчета Т. Сагия (Sagiya) осуществляет проверку исходных векторов путем расчета для реального вектора его модели, используя данные окружающих векторов, с последующей сверкой реального вектора с его моделью. В то же время в работе [2] для вычисления компонент тензора деформации в ячейке использовались данные только по трем пунктам GPS-наблюдений. В нашем случае используются все векторы, попадающие в радиус 50 км от точки расчета. Это позволяет уменьшить влияние на результат расчета возможных больших ошибок измерений в наборе данных.

В качестве источника данных сейсмических событий использовался каталог землетрясений ИС РАН за 1995, 1996–2004 гг, полученный по данным 10 станций STS-2 в результате двухэтапной обработки программами HYPOCENTER [8] и HYPODD [9] (см. пред. статью “Распределение сейсмичности и фокальные механизмы событий в пределах сейсмосети KNET”).

Результаты. Оси сжатия и растяжения, полученные по данным GPS (рис. 2), показывают, что сокращение земной коры в регионе происходит в субмеридиональном направлении, причем оно несколько меняется от района к району. Сокращение коры в меридиональном направлении подтверждается и сеймотектоническими деформациями [10]. Они, в том числе и коэффициент Лодэ-Надаи, показывают, что Северный Тянь-Шань находится в условиях простого меридионального сжатия, за исключением

Суусамырской впадины, где преобладают сдвиговые сеймотектонические деформации. Кроме того, в работе [10] отмечено соответствие результатов сеймотектонических деформаций GPS-измерениям. Эллипсы деформаций Тянь-Шаня по результатам работы [11] также подтверждают сжатие данного региона в меридиональном направлении и отмечают высокую скорость деформации в районе Суусамырской впадины. Поле скоростей деформаций, полученное в настоящей работе, имеет схожую картину с результатами исследований в работах [1, 10], но значительно отличается от подобных данных, представленных в работе [2], в которой отмечено, что распределение скоростей деформаций, рассчитанных по данным GPS, радикально отличается от скоростей сеймотектонических деформаций. При этом сеймотектонические деформации из работы [2] хорошо согласуются со скоростью дилатации из настоящей работы, но не коррелируется со скоростью деформации сдвига.

По результатам настоящей работы область максимального сжатия в регионе исследования приходится на район Суусамырской впадины; ее сокращение происходит в направлении север-юг (рис. 3). Зона максимальной скорости деформации сдвига также находится в Суусамырской впадине. При этом имеется несколько небольших областей, в которых наблюдается удлинение в широтном направлении. Можно отметить, что области с

наименьшей скоростью сжатия/растяжения расположены в районе Киргизского хребта.

Сравнение поля скорости дилатации с распределением сейсмичности (рис. 4) показывает, что зоны высокой сейсмичности расположены как в областях с высокой скоростью деформации сжатия, так и в областях высокого градиента скорости деформации сжатия. Кроме Суусамырской впадины, высокая скорость деформации присутствует в районе города Бишкек, южнее которого расположены несколько областей с высоким уровнем сейсмичности.

Иная картина наблюдается при сравнении распределения сейсмичности с полем скорости деформации сдвига (рис. 5). Высокая сейсмичность скорее совпадает с областями высокого градиента скорости деформации сдвига, чем непосредственно с самой высокой скоростью деформации сдвига. В общем случае области высокой сейсмичности совпадают как с областями высоких скоростей деформаций, так и с областями высокого градиента скоростей деформаций. При этом совсем не обязательно, чтобы области высоких скоростей деформаций были высокосейсмичными.

В то же время Суусамырская впадина, известная высокой сейсмичностью, является областью максимальных скоростей деформаций сжатия и сдвига. Немного в этом ей уступает фрагмент Киргизского хребта, граничащий с г. Бишкек.

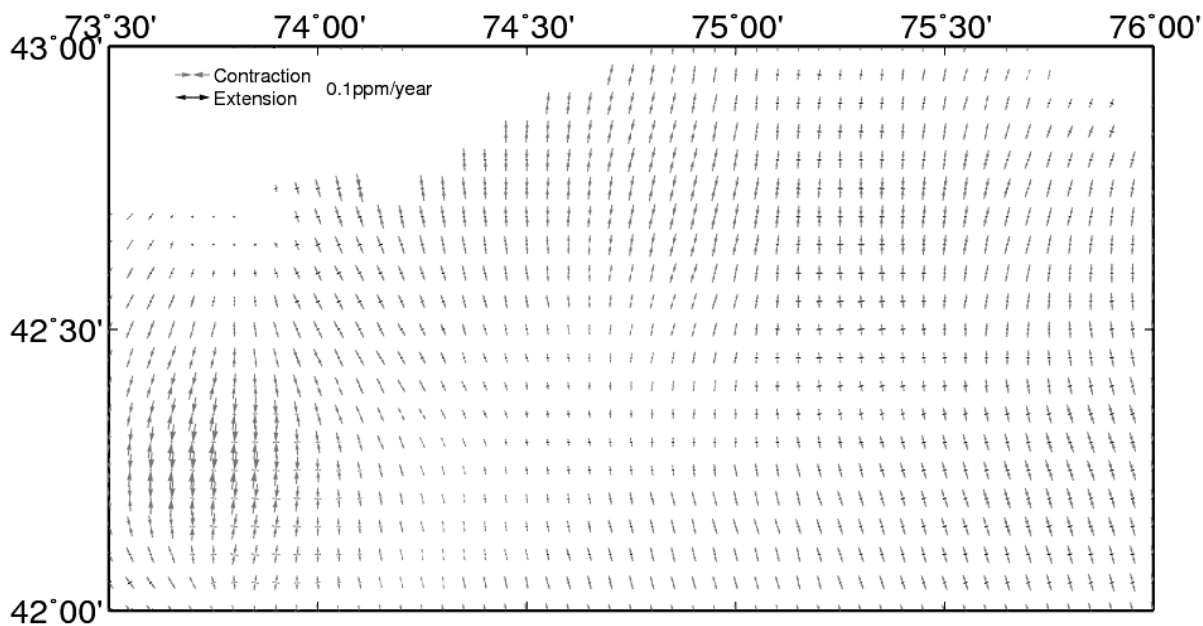


Рис. 2. Расположение осей сжатия/растяжения по данным GPS.
Серые стрелки – оси сжатия; черные – оси растяжения.

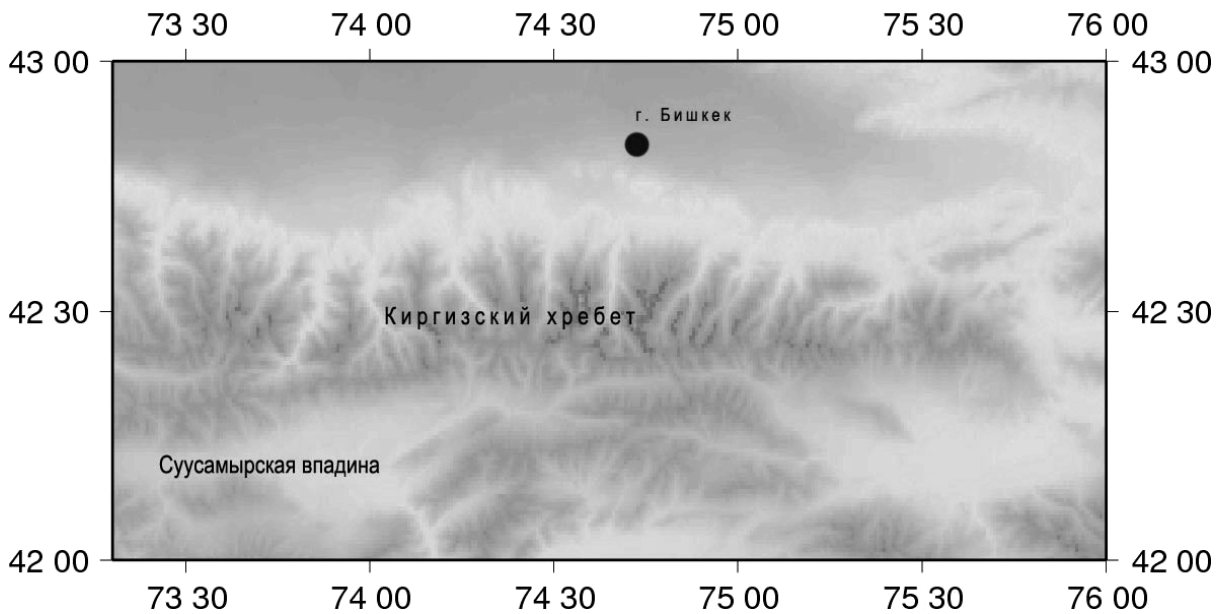


Рис. 3. Некоторые географические названия на территории Северного Тянь-Шаня.

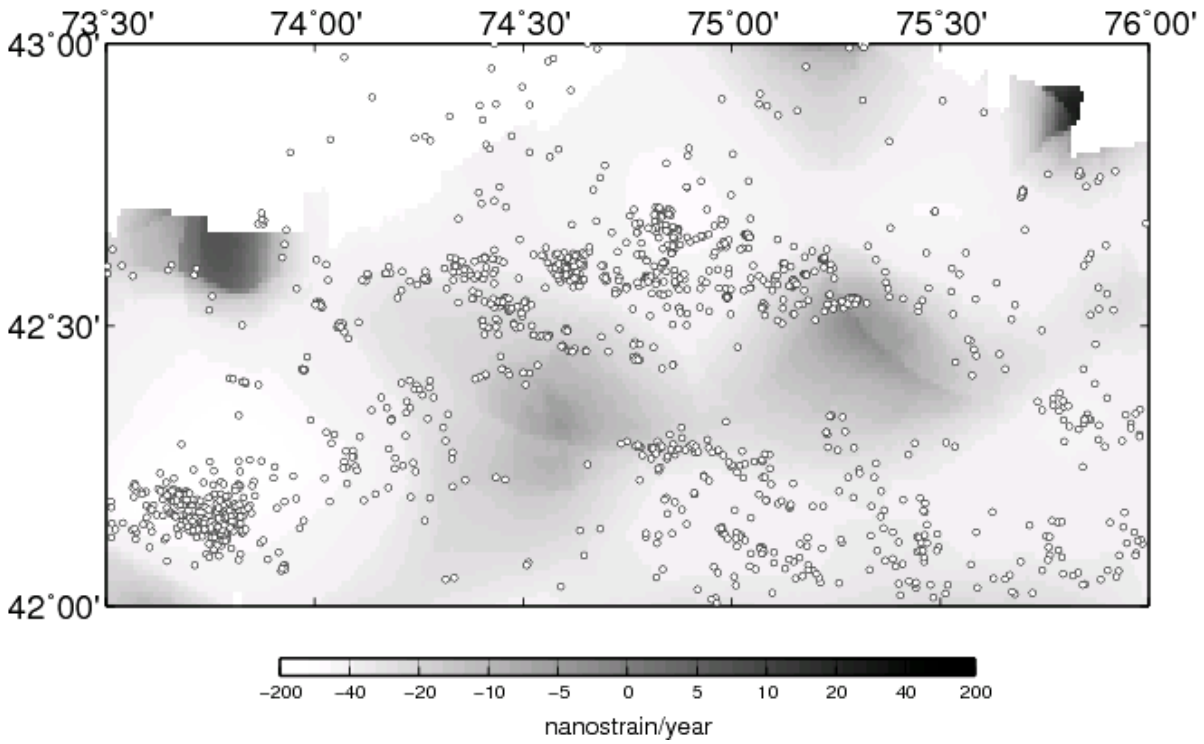


Рис. 4. Поле скорости дилатации и землетрясения.
Белые точки – эпицентры землетрясений.

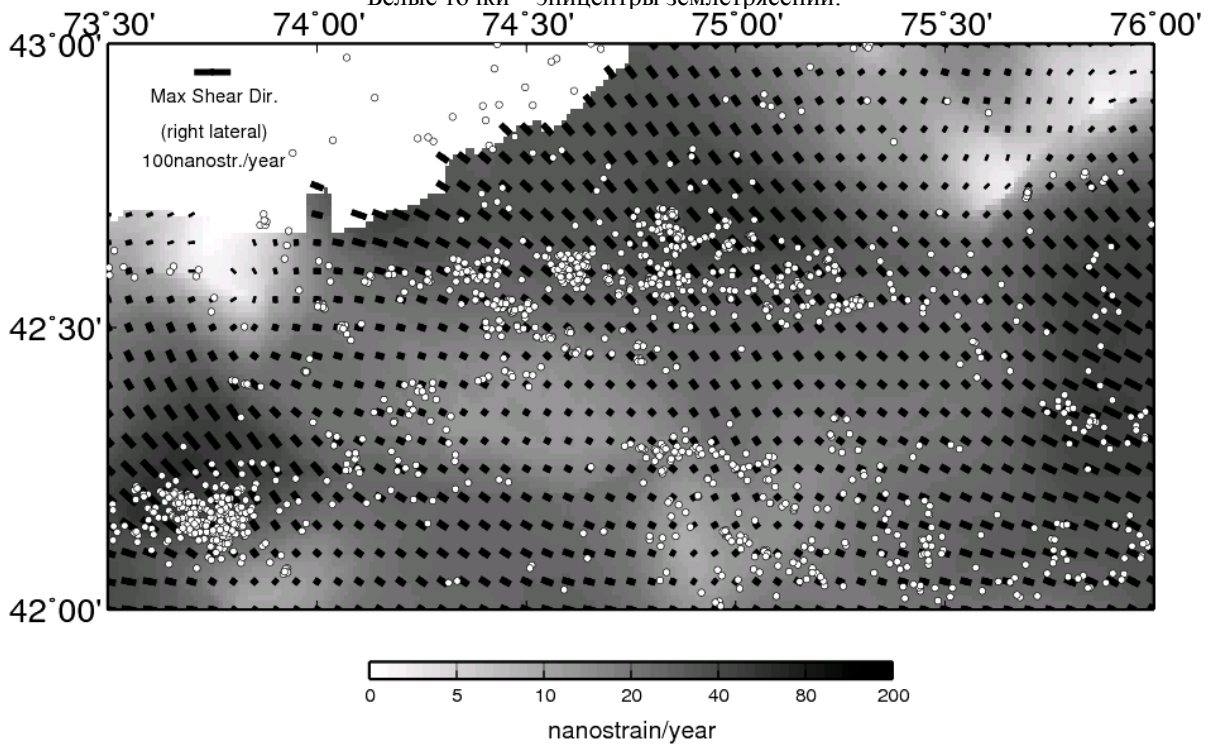


Рис. 5. Поле скорости деформации сдвига и землетрясения.
Белые точки – эпицентры землетрясений.

Выводы. Области высокой сейсмичности находятся в областях высоких скоростей деформации и высокого градиента скоростей деформации. Причем области высокой сейсмичности совпадают преимущественно с областями высокой скорости деформации сжатия и областями высокого градиента скорости деформации сдвига, однако не обязательно, чтобы области высоких скоростей деформаций были всегда высокосейсмичными.

Литература

1. *Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю.* Поле деформации, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1634–1640.
2. *Tuchkov S., Kuchai O., Bragin V., Bushenkova N., Blagovidova T., Kalmetieva Z.* Cenozoic deformation of the north Tien Shan lithosphere from GPS and seismological data // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов в XXI веке: Тезисы докл. – Бишкек, 2005.
3. *Кучай В.К.* Современная динамика Земли и орогенез Памиро-Тянь-Шаня. – М.: Наука, 1983. – 208 с.
4. *Кучай В.К., Захаров В.К.* Геодезическая основа для изучения современной динамики земли // Геология и геофизика. – 1984. – № 5. – С. 17–24.
5. *Sagiya T., Miyazaki S., Tada T.* Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan // PAGEOPH. – 2000. – V. 157. – P. 2303–2322.
6. *Shen Z., Jackson D.D., Ge B.X.* Crustal deformation across and beyond the Los Angeles Basin from geodetic measurements // J. Geophys. Res. – 1996. – V. 101. – P. 27957–27980.
7. *Zubovich A.V., Beisimbaev R.T., Wang Xiaoqi, Zhang Yunfeng, Kuzikov S.I., Mosienk O.I., Nusipov E.N., Schelochkov G.G., Scherba Yu.G.* Recent Kinematics of the Tarim – Tien Shan – Altai Region of Central Asia from GPS Measurements // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2004. – No 9. – P. 31–40.
8. *Barry R., Leinert, Berg E. and L. Neil Frazer.* Hypocenter: An Earthquake Location Method Using Centered, Scaled and Adaptively Damped Least Squares // Bull. Seism. Soc. Am. – 1986. – Vol. 76. – No. 3. – P. 771–783.
9. *Waldhauser F., Ellsworth W.L.* A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault // Bull. Seism. Soc. Am. – 2000. – V. 90. – P. 1353–1368.
10. *Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухаммадеева В.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М.* Очаговые механизмы и сеймотектонические деформации как проявления напряженного состояния коры Северного Тянь-Шаня // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска: Докл. – Алматы, 2005. – С. 41–48.
11. *Зубович А.В., Бейсенбаев Р.Т., Сяочан В., Юнфен Д., Кузиков С.И., Мосиенко О.И., Нусипов Е.Н., Щелочков Г.Г., Щерба Ю.Г.* О некоторых результатах анализа кинематики Тянь-Шаня и окружающих районов по данным GPS-наблюдений // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска: Докл. – Алматы, 2005. – С. 34–40.