

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ GPS МОНИТОРИНГА В ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТОСФЕРЫ

Виляев А.В.¹, Жантаев Ж.Ш.², Бибосинов А.Ж.¹

¹ДТОО «Институт ионосферы», Республика Казахстан, Алматы, vilayev@gmail.com

²АО «Национальный центр космических исследований и технологий»

Введение

На территории Северного Тянь-Шаня возможны землетрясения с магнитудой 8.0 и более. Такие сейсмические события, произошедшие здесь около ста лет назад, относятся к самым сильным в континентальной части Евразии за всю историю сейсмологических наблюдений [2]. Вероятность повторения подобных катастроф весьма высока в связи с продолжительным накоплением избыточных напряжений в земной коре.

ДТОО Институт ионосферы АО НЦКИТ совместно с Институтом сейсмологии МОН РК и АО НК Казахстан Ғарыш Сапары проводят мониторинг движений земной коры на территориях Северного Тянь-Шаня, Жетысуйского Алатау и городов Алматы и Астана. Вблизи г. Алматы создана и функционирует сеть непрерывных GPS-наблюдений, состоящая из десяти станций стандарта GNSS.

Исходные данные

Исходными данными являются результаты наблюдений за период 2009-2014 гг.

Станции расположены в сейсмически опасной зоне с возможной сотрясаемостью до 9-ти баллов в районе хребта Заилийский Алатау, а также в переходной области к асейсмичной части Казахского щита (рис. 1).

Координаты GPS приемников определялись с дискретностью 30 с (табл.). По единой методике обработки GPS-измерений с использованием комплекса программ GAMIT/GLOBK [6, 7] вычислялись абсолютные значения смещений по ортогональным компонентам - запад-восток, юг-север, и вертикальная компонента (смещение вверх принималось со знаком «+»).

Таблица. Постоянно действующие станции локальной сети GPS

Код станции	Наименование	Долгота, град., в.д.	Широта, град., с.ш.	Тип GPS-приемника
SELE	Селезащита	77,01689	43,17873	TurboRogue SNR 8000
TSHN	Тянь-Шань	76,94381	43,04197	Leica GRX1200GGPRO
CHLK	Чилик	78,37300	43,52900	Leica GRX1200GGPRO
CHUM	Чумыш	74,75100	42,99900	ROGUE SNR-8000
IZVS	Известковое	44,43840	33,34140	TRIMBLE 4000SST
KAST	Кастек	75,96700	43,04500	ROGUE SNR-8000
KURY	Курты	76,33900	43,89400	ASHTECH Z-XI3
MATB	Майтобе	76,42687	43,12999	TRIMBLE 4000SST
SATY	Саты	78,40800	43,05700	ASHTECH Z18
TURG	Тургень	75,38800	40,51700	ROGUE SNR-8000
CHSH	Чушкалы	76,99760	43,85394	Leica GRX1200PRO

В программе GAMIT, выполняющей оценки относительных положений станций, орбитальных параметров и параметров вращения Земли, задержки зенита, и неточности фазы, используется алгоритм наименьших квадратов при подготовке входных данных. На последующих этапах обработки программа GLOBK увязывает положение локальной сети GPS станций с мировой сетью. Для этого в расчет были включены 25 станций мировой сети IGS (рис. 1).

Обработанные данные представляют собой среднесуточные компоненты смещений координат пунктов. Скорости движений по указанным направлениям рассчитываются как линейный тренд изменения координат в мм/год за период наблюдений.

В соответствии с мировой практикой изучения таких движений, вычисления производились как в геоцентрической системе координат с использованием параметров эллипсоида WGS-84, так и в

системе отсчета для стабильной части Евразийского континента ITRF2008 [5]. Для этого в расчеты включались данные по 25-ти опорным станциям сети IGS с наиболее длинной историей наблюдений, наименьшими погрешностями и расположенные в пределах недеформируемой части Евразии, территориально включающей район локальной сети (рис. 1).

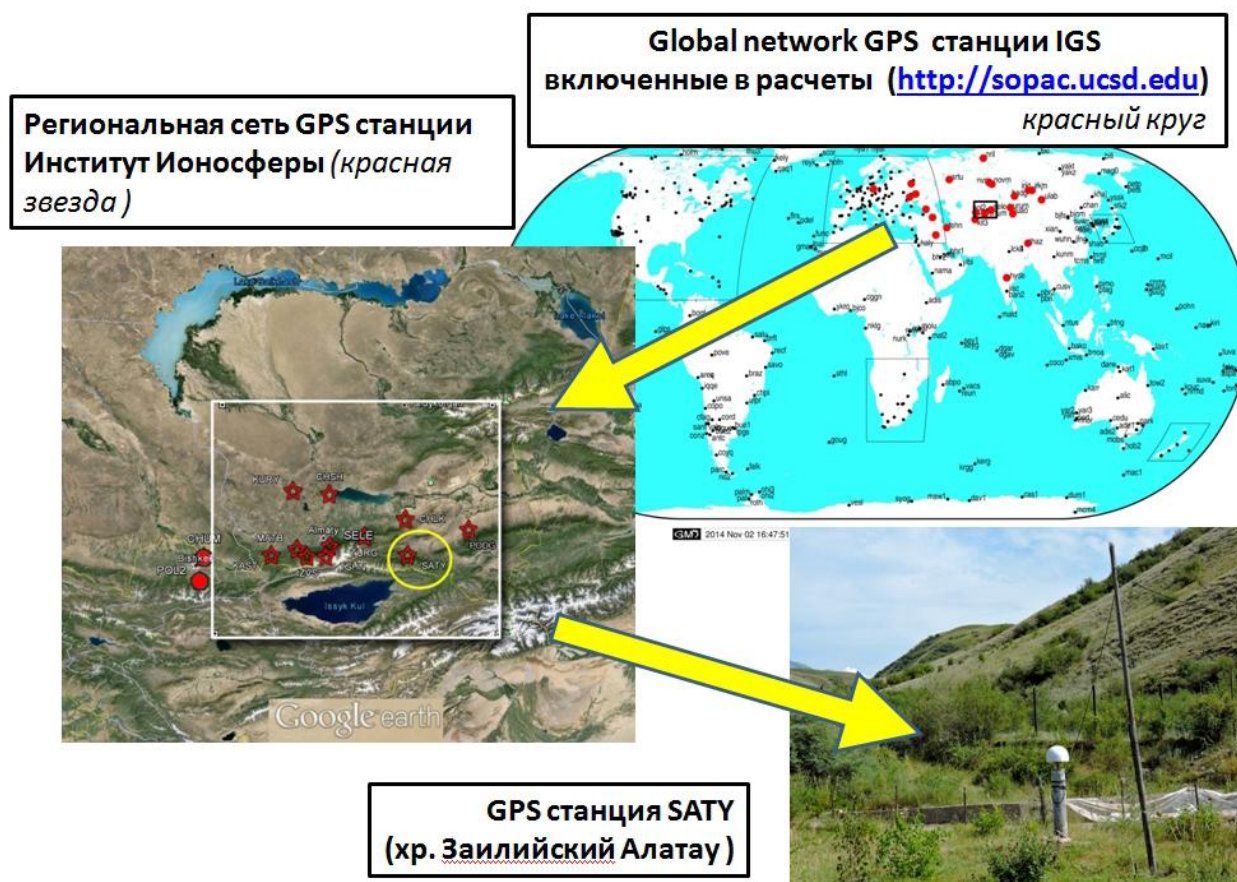


Рис. 1 Региональная сеть GPS станций геодинамического мониторинга

Для участка земной коры с координатами 42-45° N и 75-80° E построены карты компонент скоростей движений путем интерполяции измеренных значений к узлам прямоугольной сети 10×10 км. (рис. 2). Поле деформаций (рис. 3, 4) построено по скоростям отдельных станций с использованием оригинальных программ. Решения уравнений по вычислению компонент тензора деформаций и напряжений подробно изложены в теории упругости и пластичности и широко используются в механике горных пород [8, 9]. Условием применимости соотношений из [8, 9] является выполнение гипотезы о сплошности среды, в которой принимается предположение о непрерывности напряжений и перемещений, как функций координат точки. Связь между напряжениями и деформациями принималась линейной, т.е. соответствующей закону Гука.

Обсуждение результатов

Относительно центра Земли преобладающим горизонтальным движением в рассматриваемом районе является движение в направлении восток-северо-восток при значениях скоростей 1-6 мм/год для северной компоненты и 21-28 мм/год для восточной. Поле относительных горизонтальных векторов скоростей, вычисленных в системе отсчета Евразийского континента, позволяет выделить локальные неоднородности движений, которые могут быть связаны с особенностями геодинамического режима. Преобладает субмеридиональное движение отдельных блоков земной коры в северном направлении со скоростями 1-6 мм/год и знакопеременное движение со скоростями 1.5-2.5 мм/год по модулю для компоненты запад-восток (рис. 2).

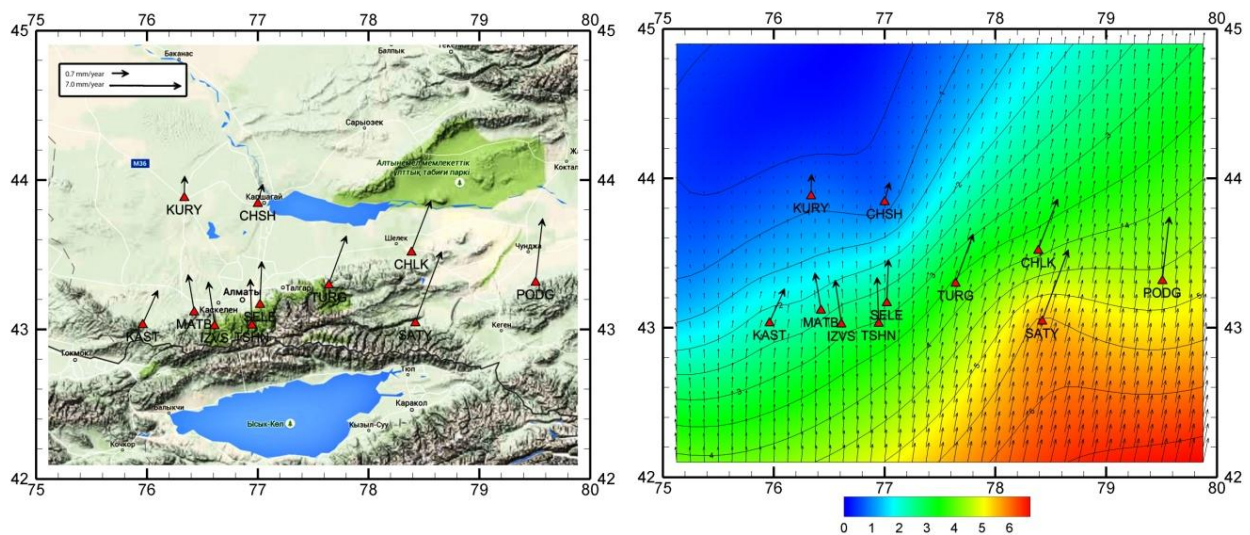


Рис. 2 Горизонтальные векторы скоростей движения GPS станций (слева) и карта интерполированных скоростей (мм/год) на сетке 10×10 км (справа).

Анализ поля скоростей северо-западной части рассматриваемого района подтверждает вывод о стабильном неподвижном положении Казахского щита относительно Евразии. На территории Казахского щита не фиксируются какие-либо внутренние деформации. Средние значения вектора скоростей горизонтальных смещений здесь не превышают 0.4 мм/год. Напротив, юго-восточная область, которая совпадает с передовой зоной коллизии континентальных плит Индийской и Евразийской, характеризуются режимом повышенных скоростей горизонтальных смещений до 5-6 мм/год. Это приводит здесь к смятию коры и образованию горных сооружений. Здесь находится самый высокий семитысячник – пик Хан-Тенгри (7010 м).

Для вертикальных движений в обеих системах отсчета характерно устойчивое поднятие западной части территории со скоростями 1.5-3.0 мм/год и опускание восточной ее части со скоростями 1.5-2.0 мм/год по широте 43° N. Знакопеременные участки вертикальных скоростей смещений совпадают с областями поднятий и опусканий (предгорные и межгорные впадины), которые развивались в течение различных интервалов времени, а также отражают современные геодинамические движения территории.

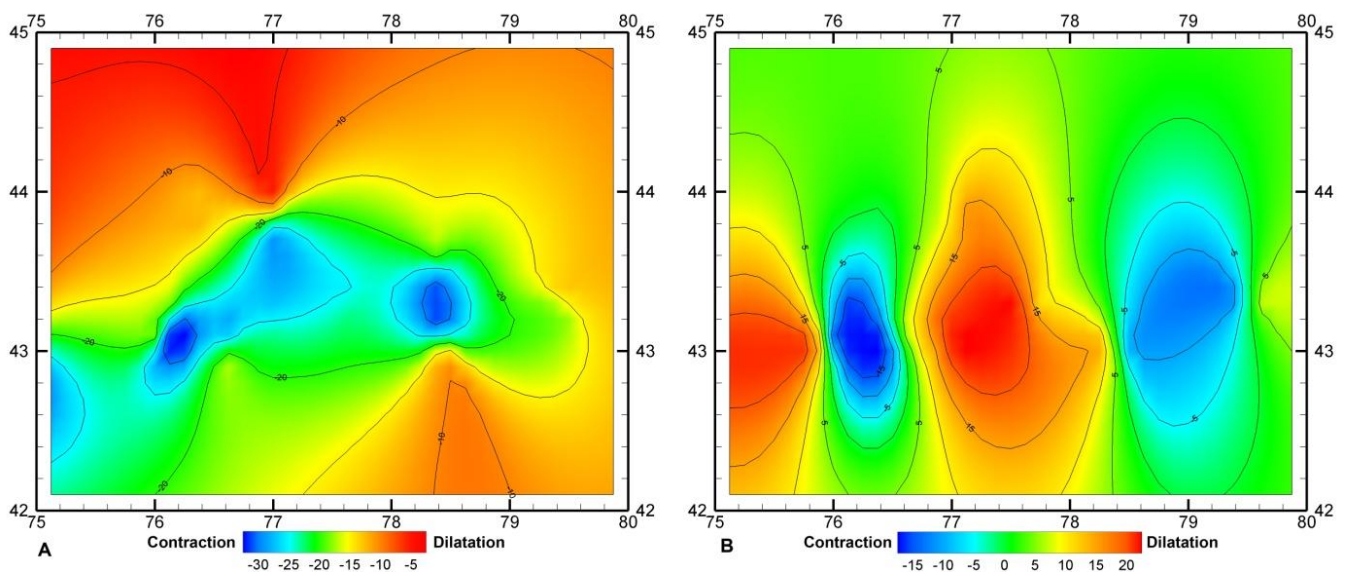


Рис. 3. Схема главных компонент деформаций (нанострейн/год) в горизонтальной плоскости (А) и по вертикали (В). Сдвиговая деформация равна нулю.

Поле деформаций региона весьма неоднородно. В поле главных компонент горизонтальных деформаций (рис. 3А) проявляется наличие в верхней части земной коры сжимающих напряжений

субширотного простирания, которые вызывают деформационное укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север до 30 нанострейн/год. В соответствии с изменением меридиональной компоненты главных деформаций в режиме деформирования центральной части проявляется ее расширение с амплитудами до 20 нанострейн/год и умеренное всестороннее сжатие до -15 нанострейн/год в двух областях, выделенных синим цветом на рис. 3В. Растягивающие напряжения, при вариабельности угла выхода до 10°, имеют преимущественно близширотную ориентацию. Подобная сеймотектоническая обстановка характерна для районов Центрального и Южного Тянь-Шаня, где большая часть землетрясений также происходит в условиях субмеридионального сжатия [3, 4]. Таким образом, подтверждается принципиальный вывод о современном геодинамическом режиме территории: смятие и поперечное (латеральное) сокращение земной коры Тянь-Шаня, формирующее его основные структурно-орографические элементы, сопровождается растягивающими деформациями вдоль продольных зон поднятий и впадин, которые обеспечивают удлинение этих зон по простиранию и, тем самым, компенсируют поперечное сокращение коры и могут рассматриваться в качестве одного из механизмов такого сокращения.

Для сопоставления современных движений и деформаций земной коры с тектоническими разломами и определения направлений действующих деформационных усилий рассчитывались углы ориентации главных осей (principal axes) [8]. Приведенное на рис. 4 поле главных осей деформаций подтверждает наличие блоков земной коры с различными геодинамическими и деформационными режимами, как по направлению сдвиговых усилий от субширотных к субмеридиональным, так и по характеру деформаций - от линейного растяжения до объемного сжатия. Ориентация главных осей деформаций совпадает с простиранием основных сеймотектонических нарушений региона, выявленных геолого-геофизическими методами, и активных в настоящее время [2].

Предполагая, что сейсмичность и деформирование земной коры являются проявлениями единого геодинамического процесса, можно считать, что их интенсивности в пространстве должны совпадать в значительной степени. Например, в [1, 4] показано, что при сравнении усредненных полей дивергенции скоростей и плотности распределения эпицентров землетрясений имеется соответствие между внешними контурами областей максимального горизонтального сжатия и величинами плотности распределения эпицентров землетрясений.

Для детального сопоставления современных движений земной коры с распределением эпицентров сильных землетрясений с $M=5.0-8.3$ рассчитывалась потенциальная энергия накопленных деформации [8]. На рис. 4В примерно по широте 43° N выделяются западная и восточная аномальные энергетические зоны. В этих зонах и их окрестностях произошли такие сильные землетрясения как Чиликское ($M=8.2$, 1889 г.), Верненское ($M=7.4$, 1887 г.), Кеминское ($M=8.1$, 1911 г.). Можно предположить, что именно в таких областях повышенного накопления энергии деформации имеются условия для возникновения будущего катастрофического события.

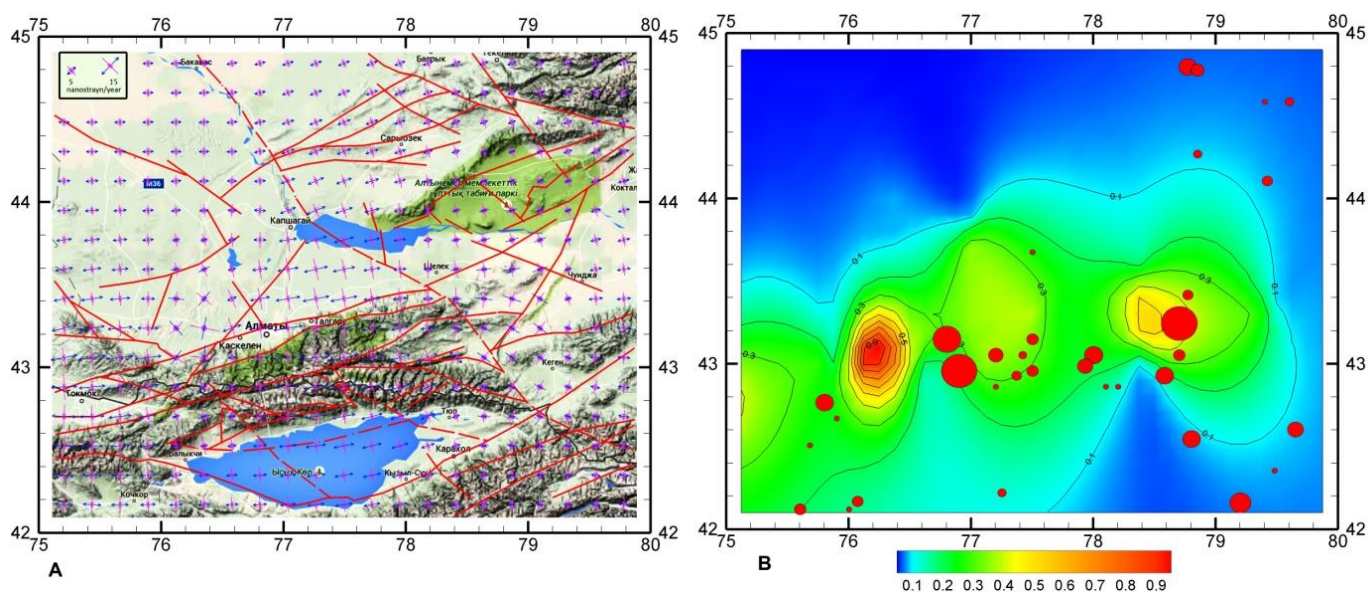


Рис. 4 Схема главных осей деформаций (А) и потенциальной энергии деформаций, нормированных на максимальное значение (В), красные линии – тектонические разломы, красные кружки – эпицентры землетрясений с $M=5.0 - 8.3$.

Заключение

Для Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий установлена пространственная корреляция между характеристиками деформационного поля по данным GPS-мониторинга и распределением сильных землетрясений. Определенное соответствие максимальных проявлений деформационного процесса и сейсмичности дает основание полагать, что они обусловлены общим геодинамическим процессом. Поэтому применение GPS наблюдений за движениями земной коры рассматриваемого региона является информативным методом оценки ее напряженно-деформированного состояния и может использоваться в целях сейсмического районирования и оценки сейсмического риска.

Работа выполнялась в рамках проекта «Разработать методы оценки геомеханического состояния земной коры кризисных территорий с использованием математического моделирования и спутниковых технологий» по Республиканской бюджетной программе 076 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности».

Список литературы

1. Zubovich A. V., Wang X., Scherba Y. G., et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // *Tectonics*, –2010.–Vol. 29, TC6014, doi:10.1029/2010TC002772.
2. Тимуш А.В. Сейсмотектоника литосферы Казахстана – Алматы, 2011. 590 с.
3. Щерба Ю.Г. Современные движения поверхности земли как отражение коровых и мантийных геодинамических процессов (на примере Центрально-Азиатского региона) - SciTecLibrary.ru, 13 июля 2007 г.
4. Zubovich A.V., 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.
5. Altamimi Z., Metivier L., Collileux X. ITRF2008 plate motion model // *J. Geophys. Res.*, 117, B07402, 2012.
6. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GAMIT GPS Analysis at MIT // Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
7. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.4 Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010B, –90 p.
8. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. *Fundamentals of rock mechanics*—4th ed., 2007 by Blackwell Publishing Ltd – 489 p.
9. Zang A., Stephanson O. *Stress Field of the Earth's Crust*. Springer, 2010. 327 p.