

УДК 550.343.4

Геология**ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В АЗЕРБАЙДЖАНЕ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ****Академик НАН Азербайджана Ф.А.Кадилов, Р.Т.Сафаров, С.К.Маммадов**

Исследованы деформации земной коры территории Азербайджана по результатам GPS-измерений на основе метода Шена Shen et. al. (1996). Для оценки скорости деформации использовалось поле векторов скоростей территорий Азербайджана, Ирана, Грузии и Армении, полученных по данным GPS-измерений за период 1998-2012 годы. Установлено, что сжатия наблюдаются вдоль Большого Кавказа, в Гобустане, Куринской впадине, Нахчыванской АР и приграничных районах Ирана. Оси сжатия/сокращения земной коры в регионе Большого Кавказа имеют С-СВ направление. Максимальное значение скорости деформации (порядка 200×10^{-9} в год) наблюдается между пунктами KHIID (Хыдырлы) и SHIK (Шыхлар), где ось сжатия резко меняет направление на ЮЗ-СВ. Зоны растяжения наблюдаются на Малом Кавказе: в Гядабейском (GEDA), Шушинском (SHOU) районах, где величина скорости деформации достигает значений до 100×10^{-9} в год. Наблюдается корреляция зоны эпицентров сильных землетрясений с градиентной зоной поля скорости деформации земной коры.

Ключевые слова: GPS измерения, деформация, сжатие, растяжение

Введение

Территория Азербайджана располагается в зоне активного столкновения (коллизии) двух континентов, Африканского и Евразийского [6]. Реконструкция тектоники плит указывает на то, что коллизия Аравийской плиты с Евразийской продолжается 10-30 млн. лет, вплоть до современного этапа. Скорость движения Аравийской плиты на север относительно Евразии с начала их столкновения более или менее постоянна и равна приблизительно 20 мм/год [7, 9].

Это продолжающееся "вторжение" Аравийской плиты в Евразию обуславливает сокращение литосферы по Главному Кавказскому надвигу (ГКН), простирающемуся в направлении В-З, и горизонтальное смещение литосферы [6, 2, 9, 4, 3]. Эти региональные тектонические процессы, являясь причиной деформации земной коры, вызывают землетрясения, которые исторически зарегистрированы по всей территории Кавказа.

Настоящая работа посвящена исследованию скорости деформаций земной коры территории Азербайджана по данным GPS наблюдений и ее связи с сейсмичностью.

Результаты GPS наблюдений. GPS-

сеть Азербайджана создана Институтом геологии Национальной Академии наук Азербайджана в сотрудничестве с Массачусетским технологическим институтом. Сеть была создана в период 1998-2012 гг., в большинстве пунктов измерения проведены по 3-6 раз [9, 4, 3]. В настоящее время на территории Азербайджана функционируют 22 GPS пункта периодических наблюдений и 3 постоянно действующие станции CGPS (Баку, Шеки и Нефтчала).

GPS-данные были обработаны, а ошибки оценены с использованием программного обеспечения GAMIT/GLOBK Массачусетского технологического института [5,1] по процедуре, описанной в работе [9].

Для облегчения интерпретации данных окончательно скорости показаны в рамках фиксированной Евразийской системы координат. В результате вычислений для каждого пункта была определена усредненная за общий интервал наблюдений скорость покомпонентного смещения. Таким образом, исходные данные для оценки скорости деформации представляют собой поле векторов скоростей, полученных по данным GPS за интервал времени 1998-2012 годы.

На рис. 1 показана карта скоростей GPS-пунктов для Азербайджана и сопредельных территорий (указанных в таблице), которая использована для расчета двумерных деформаций. Стрелки на рисунке показывают направление векторов скорости, а значения скоростей характеризуются длиной стрелок согласно масштабу, который приведен в нижнем правом углу карты. Определенные минимизацией скорости GPS-пунктов показаны в рамках Евразийской системы координат.

Ошибка определения скорости составляет в основном меньше чем 0,6 мм/год (1 сигма) и позволяет довольно точно оценить конвергенцию поперёк Кавказской горной системы (т.е. ошибка составляет 5% от полной скорости конвергенции).

Поле скорости GPS-наблюдений четко иллюстрирует движение поверхности земной коры в С-СВ направлении на территории Азербайджана и смежных регионов Малого Кавказа относительно Евразии. Самая явно проявленная особенность скоростного поля – уменьшение скорости в пунктах наблюдений, расположенных перпендикулярно к ГКН (то есть между пунктами KURD и MEDR, и BILE и SHIK). Пункты GPS-наблюдений, расположенные вдоль ГКН, показывают уменьшение скорости в западном направлении. С-СВ движение земной поверхности интерпретируется как одна из причин накопления напряжений на этом надвиге.

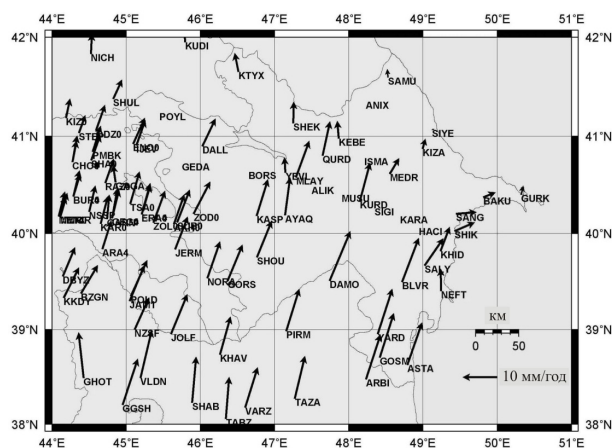


Рис.1. Карта GPS-скоростей исследуемой территории. Данные о скоростях пунктов, находящихся вне территории Азербайджана, взяты из работ [9], [8]

Кроме того, здесь имеется тенденция горизонтального движения в пределах Куринской депрессии и Малого Кавказа, где увеличивается скорость с запада на восток вдоль простираения горной цепи.

Метод вычисления деформаций земной коры по данным GPS измерений. Современные движения, наблюдаемые на земной поверхности, отражают тектонические процессы внутри земной коры. Однако точность определения вертикальной компоненты скорости с помощью GPS-измерений значительно уступает точности определения горизонтальных составляющих скорости. Так как деформацию земной коры можно считать непрерывной и рассматривать как изменение формы и объема тела, то каждой точке земной коры и ее поверхности будет соответствовать относящийся к данному моменту времени тензор деформации. Отметим, что при анализе только горизонтальной компоненты современных движений земной поверхности, возможно оценить плоскую деформацию. В данной работе для этих целей используются горизонтальные компоненты GPS-скоростей.

В настоящей работе для определения поля скорости горизонтальной деформации территории Азербайджана по данным GPS-наблюдений применялся метод Шена [11, 10] с использованием программы Sagiya [10].

Анализ деформационного состояния исследуемой территории. Распределения деформаций для исследуемой территории, вычисленные по методике Шена [11], приводятся на рисунке 2. Из анализа рисунка следует, что хотя доминирующим режимом является сжатие, деформации земной коры территории Азербайджана распределены неравномерно.

Сжатия наблюдаются на Большом Кавказе, в Гобустане, Куринской впадине, Нахчыванской АР и приграничных районах Ирана. Оси сжатия показывают, что сокращение земной коры в регионе Большого Кавказа происходит в направлении С-СВ, причем оно в районе Шамахи (MEDR) почти субмеридиональное.

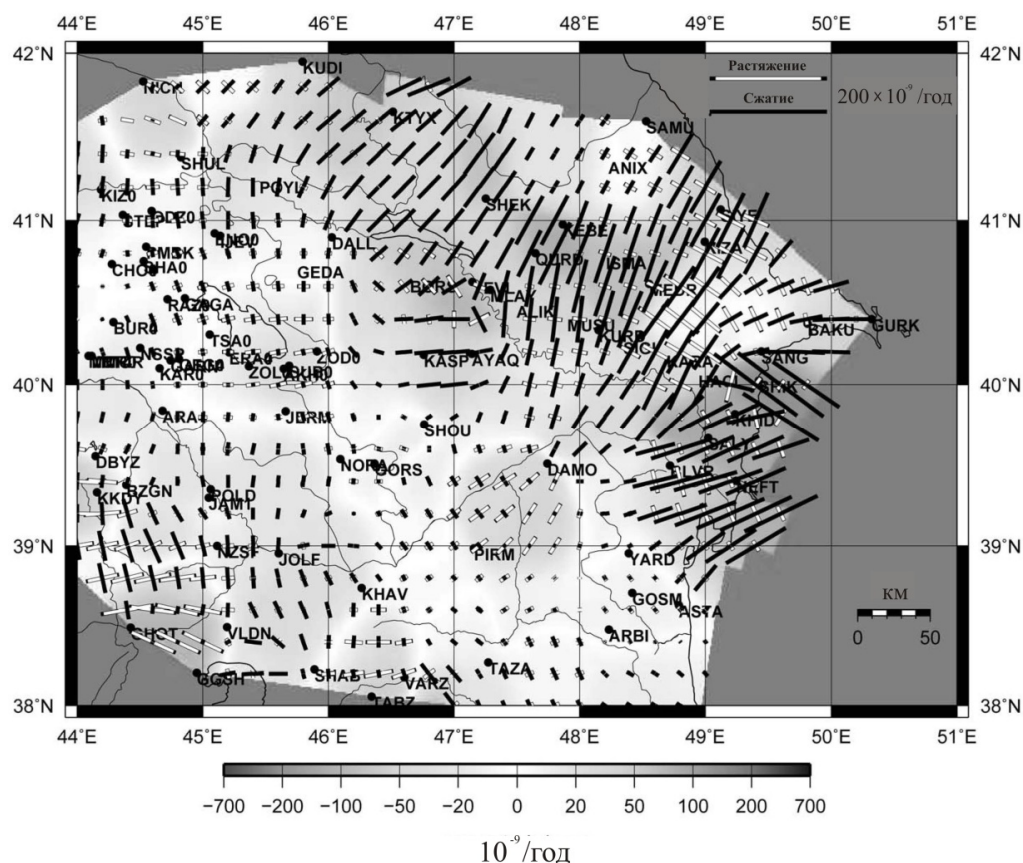


Рис. 2. Расположение осей сжатия/растяжения и поле скорости дилатации по данным GPS. Сплошные черные линии показывают направления оси сжатия, а белые – растяжения (nanostrain - 10^{-9})

Максимальное значение скорости деформации (порядка 200×10^{-9} в год) наблюдается в районе между пунктами KHUD (Хыдырлы) и SHIK (Шыхлар), и здесь ось сжатия резко меняет направление и ориентируется в ЮЗ-СВ направлении (на юге Гобустанской и северной части Нижне-Куринской структурных зон). В районе г. Сальян, Билясувар и Нефтяла ось сжатия также резко меняет направление.

Из рисунка 2 видно, что в деформационном поле наряду с областями сжатия проявились зоны, где деформации практически отсутствуют (величина скорости дилатации меньше 5×10^{-9} в год). К таким зонам относятся Прикаспийско-Губинский район (пункты ANIX, SAMU) и северная часть Гобустана (или восточная часть Загатала-Говдагской структурной зоны). В этих зонах растяжение почти компенсируется сжатиями.

Зоны растяжения наблюдаются на Малом Кавказе: в Гядабейском (GEDA), Шушинском (SHOU) районах и в зоне, расположенной между пунктами DAMO и PIRM (Иран). В этих зонах величина скорости дилатации достигает значений до 100×10^{-9} в год. Выявленный неоднородный характер деформационного поля региона позволяет констатировать блочную модель строения региона, наиболее близкую к реальной. Аналогичный вывод о блочном строении получен также для других регионов [13]. Для решения задачи выявления границ микроплит необходимо увеличение числа станций GPS-наблюдений.

Анализ распределения эпицентров сейсмических событий. На рис. 3 показано распределение сейсмических событий с $M \geq 4$, произошедших в 1998-2012 гг., на фоне карты скорости деформации.

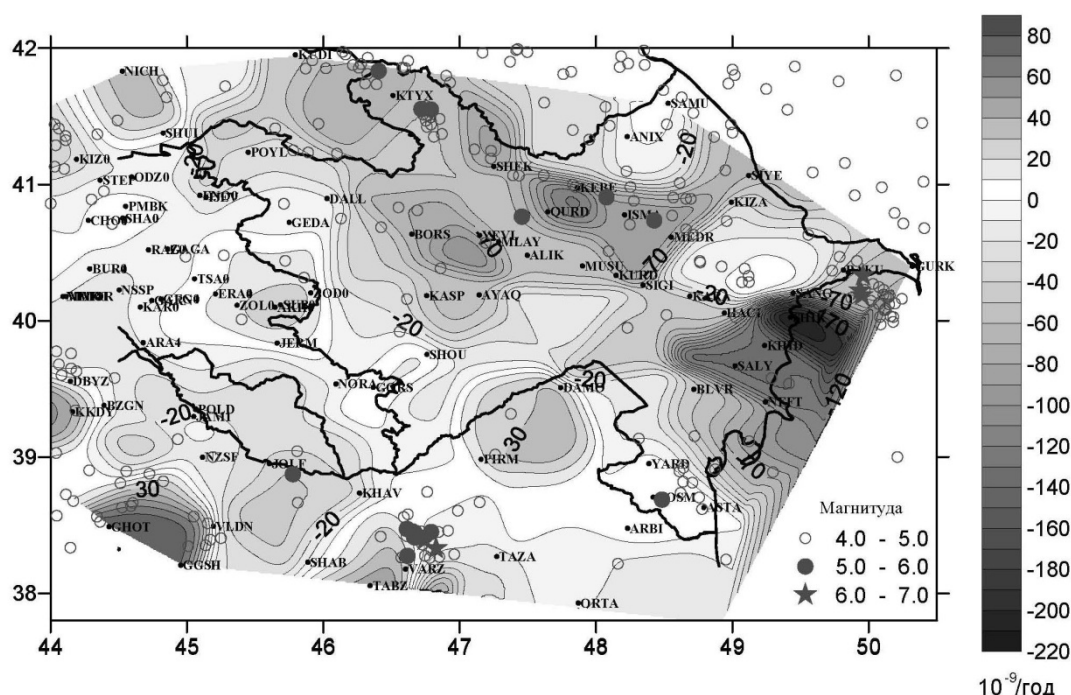


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений с $M \geq 4$ и поле скорости деформации (1998-2012 гг.)

Распределение эпицентров построено с использованием материалов Республиканского Центра Сейсмологической Службы Национальной Академии наук Азербайджана (<http://www.seismology.az>); Геофизической Службы Российской Академии наук; а также открытой информации международных сейсмологических центров, таких как EMSC и IRIS.

Как видно из рисунка, за период 1998-2012 гг. эпицентры сильных землетрясений (с $M \geq 5$), как правило, приурочиваются к градиентной зоне деформации.

Основные выводы

- Изучение результатов GPS наблюдений на территории Азербайджана с учетом данных по соседним странам (Ирана, Грузии и Армении) позволило выявить неоднородный характер деформационного поля региона. Этот факт позволяет констатировать блочную модель строения региона, близкую к действительности. Увеличение числа станций GPS-наблюдений будет способствовать детализации деформационного поля и выявлению границ микроплит.

- Выделена зона деформаций сжатия (со скоростью до 200×10^{-9} в год), протяну-

таясь через весь Большой Кавказ, с осью сжатия юг-северо-восточного направления. Эту зону окружают участки, испытывающие растяжение, или участки, где деформации практически отсутствуют.

- Зоны растяжения наблюдаются на Малом Кавказе и на приграничной территории Ирана. В этих зонах величина скорости дилатации достигает значений до 100×10^{-9} в год.

- Пространственное распределение землетрясений с $M \geq 5$ указывает, что их местоположение, как правило, приурочивается к градиентным зонам поля деформации земной коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Herring, T.A. 2004. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program version 4.1. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA.
2. Jackson, J. 1992. Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey, *J. Geophys. Res.*, 97, 12471-12479.
3. Kadirov, F., Floyd, M., Alizadeh, A., Guliev, I., Reilinger, R., Kuleli, S., King, R., Toksoz, N. 2012. Kinematics of the eastern Caucasus near Baku, Azerbaijan. *J. Nat. Hazards*, doi:10.1007/s11069-012-0199-0.
4. Kadirov, F.A., Mammadov, S.A., Reilinger, R., McClusky,

- S. 2008. Some new data on modern tectonic deformation and active faulting in Azerbaijan (according to Global Positioning System Measurements). *Proceedings Azerbaijan National Academy of Sciences. The Sciences of Earth*. 1, 82-88
5. King, R.W., Bock, Y. 2004. Documentation of the MIT GPS analysis software: GAMIT. Mass. Inst. of Technol. Cambridge.
6. McKenzie, D.P. 1972. Active tectonics of the Mediterranean region, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 30, 239-243.
7. McQuarrie, N., Stock, J., Verdel, C., Wernicke, B.P. 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 30(20), 2036, doi:10.1029/2003GL017992.
8. Nilforoushan, F., Masson F., Vernant, P., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, M., Nankali, H., Hatzfeld, D., Bayer, R., Tavakoli, F., Ashtiani, A., Doerflinger, E., Daignières, M., Collard, P., Chéry J. 2003. GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *J. Geodesy*, 77, 411-422.
9. Reilinger, R., McClusky, S., Ararajehi, A., Mahmoud, S., Ryan, A., Ghebreab, W., Ogubazghi, G., Al-Aydrus, A. 2006a. Geodetic constraints on rupturing of the continental lithosphere along the Red Seam *MARGINS Newsletter*, 17, 16-19.
10. Sagiya, T., Miyazaki, S., Tada, T. 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *PAGEOPH*, 157, 2303-2322.
11. Shen, Z., Jackson, D.D., Ge, B.X. 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles Basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B12), 27957-27980. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB02544>.
12. Wessel, R., Smith, W.H.F. 1995. New version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans AGU*, 76, 329.
13. Костюк, А.Д., Сычева, Н.А., Юнга, С.Л., Богомолов, Л.М., Ягу, Ю. 2010. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии// *Физика Земли*, 3, 52-65.

*Институт геологии и геофизики
НАН Азербайджана*

AZƏRBAYCAN ƏRAZISİNDƏ YER QABIĞI DEFORMASIYALARININ GPS ÖLÇÜ MƏLUMATLARI ƏSASINDA TƏDQIQI

F.A.Qədirov, R.T.Səfərov, S.Q.Məmmədov

Azərbaycan ərazisində aparılmış GPS ölçülərinin nəticələri əsasında Şen üsulu (Shen et. al., 1996) tətbiq edilməklə yer qabığı deformasiyaları tədqiq olunmuşdur. Deformasiya sürətinin qiymətləndirilməsi məqsədi ilə Azərbaycan, İran, Gürcüstan və Ermənistan GPS şəbəkələrindən 1998-2012-ci illər üçün əldə olunmuş GPS sürət vektorlarından istifadə edilmişdir. Böyük Qafqazda, Qobustanda, Kür çökəkliyində, Naxçıvan MR və İranla həmsərhəd ərazilərdə sıxılma zonaları müəyyən edilmişdir. Böyük Qafqaz ərazisində sıxılma/genişlənmə oxları şimal-şimal-şərq istiqamətinə malikdir. Deformasiya sürətinin maksimal qiymətləri (200×10^{-9} /il) KHID (Xıdırılı) və SHIK (Şıxlar) məntəqələri arasında müşahidə olunur və burada sıxılma oxu kəskin şəkildə istiqamətini dəyişərək cənub-qərb-şimal-şərq istiqamətinə yönəlir. Genişlənmə zonaları Kiçik Qafqazda: GEDA (Gədəbəy), SHOU (Şuşa) rayonlarında müşahidə olunur və burada deformasiya sürətinin qiyməti 100×10^{-9} /il-ə çatır. Güclü zəlzələ episentrlləri zonası ilə yer qabığı deformasiya sürət sahəsinin qradient zonası arasında korrelyasiya müşahidə olunur.

Açar sözlər: GPS ölçüləri, deformasiya, sıxılma, genişlənmə

CRUSTAL DEFORMATION IN AZERBAIJAN TERRITORY ON THE BASIS OF GPS MEASUREMENT RESULTS

F.A.Kadirov, R.T.Safarov, S.G.Mammadov

Crustal deformation investigated in Azerbaijan territory on the basis of GPS-measurement results using Shen method (1996). Velocity vectors obtained from Azerbaijan, Iranian, Georgian and Armenian GPS networks for the period of 1998-2012 years were used in order to evaluate the strain rates. Contraction observed in the Greater Caucasus, Gobustan, the Kura depression, Nakhchevan AR and in the border areas with Iran. Contraction/extension axes of earth's crust in the Greater Caucasus region are in N-NE direction. Maximum strain rates (about 200×10^{-9} /year) observed in area between KHID (Khidirly) and SHIK (Shikhar) points, and here the contraction axes sharply changes its direction and oriented in SW-NE direction. Extension observed in Lesser Caucasus: Gedabey (GEDA), Shusha (SHOU) regions where the dilatation rate reaches up to 100×10^{-9} /year. There is a observed correlation between zones of strong earthquake epicenters and gradient zones of the strain rate field.

Keywords: GPS measurements, deformation, contraction, extension