

ДЕФОРМАЦИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ АЗЕРБАЙДЖАНА И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ДАННЫМ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ

Ф.А.Кадиров, Р.Т.Сафаров

Институт геологии НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А

Исследованы деформации земной коры территории Азербайджана по результатам GPS-измерений на основе метода Шена. Для оценки скорости деформации использовалось поле векторов скоростей территорий Азербайджана, Ирана, Грузии и Армении, полученных по данным GPS-измерений за интервал времени с 1998 по 2012 годы. Сжатия наблюдаются вдоль Большого Кавказа, в Гобустане, Куриńskiej впадине, Нахчыванской АР и приграничных с Ираном районах. Оси сжатия показывают, что сокращение земной коры в регионе Большого Кавказа происходит в направлении С-СВ. Максимальное значение скорости деформации (порядка $400 \cdot 10^{-9}$ в год) наблюдается в районе между пунктами KH1D (Хыдырлы) и SHIK (Шыхлар), и здесь ось сжатия сильно меняет направление на ЮЗ-СВ. В деформационном поле наряду с областями сжатия проявились зоны, где деформации практически отсутствуют. К таким зонам относятся Прикаспийско-Губинский район и северный Гобустан. Зоны растяжения наблюдаются на Малом Кавказе: в Гядабейском (GEDA), Шушинском (SHOU) районах и в зоне, расположенной между пунктами DAMO и PIRM, где величина скорости дилатации достигает значений до $100 \cdot 10^{-9}$ в год.

Введение

Территория Азербайджана располагается в зоне активного столкновения (коллизии) двух континентов, Африканского и Евразийского (McKenzie, 1972; Sengor et al., 1985; Philip et al., 1989). Реконструкция тектоники плит указывает на то, что первичная коллизия Аравийской плиты с Евразийской продолжается в интервале времени 10-30 млн. лет, вплоть до современного этапа (Robertson, 2000; Allen et al., 2004), и значение скорости движения Аравийской плиты на север относительно Евразии с тех пор, как началось столкновение, осталось более или менее постоянным и приблизительно равно 20 мм/год (McQuarrie et al., 2003; Reilinger et al., 2006a).

Согласно этим реконструкциям, Аравийская плита продвинулась от своего первоначального места на 200-600 км, к месту, где прежде находилась континентальная евразийская литосфера.

Это продолжающееся "вторжение" Аравийской плиты в Евразию обуславливает сокращение литосферы по Главному Кавказскому надвигу (ГКН), простирающемуся в направлении В-З, и горизонтальное смещение литосферы из зоны столкновения правостороннего сдвигового разлома (McKenzie, 1972;

Sengor et al., 1985; Jackson, 1992; Kadirov, 2004; 2008; 2012; Reilinger et al., 2006b). Эти региональные тектонические процессы, являясь причиной деформации земной коры, вызывают землетрясения, которые исторически зарегистрированы по всей территории Кавказа.

Данные GPS-наблюдений, выполненных в Азербайджане и на сопредельных территориях, позволяют оценить современные поверхностные движения и связанные с ними деформации земной коры. Наблюдаемые движения (скорости в пунктах наблюдений) позволяют нам идентифицировать (определять) зоны быстрого накопления напряжения, которое мы интерпретируем, как результат глубинного скольжения по разлому, запертому на той или иной глубине земной коры. Вероятно, в будущем они могут вызвать землетрясения.

Настоящая работа посвящена исследованию деформации земной коры территории Азербайджана по данным GPS, что актуально для оценки природных опасностей региона.

GPS-скорости

GPS-сеть Азербайджана создана Институтом геологии Национальной Академии наук Азербайджана в сотрудничестве с Массачусетским технологическим институтом.

Сеть была установлена в течение периода 1998-2012 гг., в большинстве пунктов измерения проведены по 3-6 раз. Геометрия сети и местоположение пунктов измерений определялись, исходя из неотектонической структуры региона так, чтобы в максимально возможной степени охарактеризовать относительные смещения отдельных элементов этой структуры и общую деформацию земной коры. В настоящее время на территории находятся 22 пункта наблюдения, из них 3 – постоянно действующие станции CGPS (Баку, Шеки и Нефчала).

GPS-данные были обработаны, а ошибки оценены с использованием программного обеспечения GAMIT/GLOBK Массачусетского технологического института (King and Bock, 2004; Herring, 2004) по процедуре, описанной в работе Reilinger et al. (2006б). Данные измерения GPS обработаны двухэтапным методом (Dong et al., 1998).

На первом этапе с помощью программы GAMIT определяются неточности в зависимости от координат станций, параметров орбит, ориентации Земли и от атмосферных задержек зенита. Данные, полученные от GPS-сети Азербайджана, были проанализированы наряду с необработанными данными GPS от других непрерывно работающих станций в регионе.

На втором этапе глобальный Kalman фильтр (GLOBK) использовался для оценки последовательного набора координат станций

и скоростей, комбинируя ежедневно свободно ограниченные решения, полученные на первом этапе, и их связанные ковариации.

Относительно системы координат, в рамках которой проводятся измерения GPS, отметим следующее. Первоначально обработка измерений была выполнена в Международной земной системе относимости 2000 (ITRF 2000) с использованием 49 станций международной геодинамической службы GNSS (IGS). Другими словами, векторы скоростей были вычислены не относительно какого либо отдельного пункта IGS, а привязаны ко всей их совокупности, имеющей большую стабильность во времени, чем каждый индивидуальный пункт в отдельности.

Случайное блуждание помехи 1мм/год было также добавлено к погрешности скорости для каждого сайта. Окончательно скорости для облегчения интерпретации показаны в рамке 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. В таблице представлены координаты и скорости горизонтальных смещений GPS-пунктов Азербайджана и сопредельных территорий.

Координаты, скорости горизонтальных смещений GPS-пунктов Азербайджана и сопредельных территорий

Долгота (градус)	Широта (градус)	Е и N скорости (мм/год)		Е и N ± (мм/год)		RHO	Название GPS пунктов
1	2	3	4	5	6	7	8
GPS-сеть Азербайджана							
49,814	40,372	3,49	1,42	0,69	0,58	-0,002	BAKU
49,446	40,203	5,95	0,45	1,06	1,09	0,018	SANG
49,426	40,025	5,8	2,53	0,51	0,52	0,002	SHIK
49,237	39,818	2,66	6,97	1,94	1,97	-0,002	KHID
49,12	41,066	0,62	0,17	0,93	0,94	0	SIYE
48,993	40,87	0,8	2,87	0,91	0,92	0,001	KIZA
48,717	39,497	4,82	12,66	0,46	0,47	-0,007	BLVR
48,551	40,614	2,72	4,48	0,7	0,7	0	MEDR
48,529	41,595	-0,21	2,35	0,58	0,59	-0,006	SAMU

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
48,419	38,706	4,05	12,75	0,47	0,48	-0,013	GOSM
48,388	38,952	4,2	12,96	0,56	0,57	-0,007	YARD
48,148	40,333	2,94	11,01	0,54	0,56	-0,002	KURD
47,863	40,975	-0,42	5,06	0,78	0,78	-0,001	KEBE
47,647	40,8	2,14	9,84	1,09	1,14	-0,011	QURD
47,286	40,58	3,86	10,5	1,5	1,5	0,002	MLAY
47,25	41,132	0,13	6,21	0,47	0,48	-0,001	SHEK
47,146	40,626	-0,25	4,38	0,98	1,01	-0,011	YEVL
47,143	40,19	1,44	10,89	1,2	1,25	-0,011	AYAQ
46,76	39,753	4,28	10,49	0,93	0,94	-0,001	SHOU
46,758	40,184	3,27	10,51	0,56	0,58	-0,01	KASP
46,027	40,897	3,81	7,95	1,06	1,06	0,004	DALL
46,511	41,652	-1,08	5,41	0,63	0,63	-0,005	KTYX
GPS-сеть Ирана							
48,922	37,764	1,32	12,45	1,22	1,24	0	HASH
48,231	38,477	4,18	12,87	0,63	0,64	-0,005	ARBI
47,869	37,929	2,8	13,49	1,03	1,04	0	ORTA
47,271	38,27	2,93	12,23	1,68	1,68	0	TAZA
47,157	38,984	3,75	12,1	1,68	1,69	0	PIRM
46,603	38,178	3,6	11,56	0,73	0,74	-0,004	VARZ
46,343	38,056	0,95	12,09	0,68	0,68	-0,002	TABZ
46,265	38,736	3,05	10,9	1,05	1,06	0,001	KHAV
45,887	38,228	1,16	13,25	1,02	1,02	-0,002	SHAB
45,605	38,952	4,71	11,41	1,05	1,06	0	JOLF
45,193	38,492	3,26	13,77	0,66	0,66	-0,003	VLDN
45,114	38,999	4,18	9,24	0,62	0,63	-0,002	NZSF
44,954	38,207	4,36	13,23	0,68	0,69	-0,004	GGSH
45,049	39,297	4,21	10,25	1,03	1,04	-0,001	JAM1
45,062	39,351	4,74	10,35	0,63	0,64	-0,004	POLD
44,428	38,489	-1,46	13,11	1,04	1,05	-0,002	GHOT
44,392	39,379	4,85	8,13	0,7	0,71	-0,003	BZGN
44,16	39,332	4,44	8,74	0,74	0,75	-0,001	KKDY
GPS-сеть Армении							
46,367	39,511	4,33	10,43	0,44	0,63	-0,008	GORS
46,093	39,536	3,67	10,58	0,93	0,94	0	NORA
45,908	40,204	4,8	9,25	0,95	0,97	-0,006	ZOD0
45,686	40,117	3,64	9,39	0,97	1	-0,009	SUB0
45,661	39,837	3,63	9,36	0,51	0,73	-0,007	JERM
45,645	40,099	3	8,58	1,05	1,07	-0,002	AKH0
45,367	40,114	3,36	9,17	0,93	0,96	-0,004	ZOL0
45,209	40,198	2,5	8,99	0,55	0,55	-0,004	ERA0
45,209	40,198	2,53	8,46	0,77	0,78	-0,004	ERA4
45,139	40,907	2,57	7,28	0,4	0,45	-0,012	IJEV
45,094	40,92	3,4	7,52	0,85	0,87	-0,004	ENO0
45,055	40,307	2,68	9,26	0,88	0,9	0,002	TSA0
44,859	40,526	-0,73	4,93	1,06	1,04	-0,008	GAGA
44,81	40,16	1,6	8,7	0,54	0,55	-0,007	GEG0

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
44,81	40,159	2,02	8,22	0,78	0,79	-0,006	GEG4
44,742	40,149	0,63	7,04	1,19	1,2	-0,002	GARN
44,718	40,52	2,47	6,98	1,04	1,08	-0,006	RAZ0
44,679	39,84	2,57	8,18	0,78	0,79	-0,002	ARA4
44,657	40,101	2,12	7,97	0,94	0,96	-0,003	KAR0
44,593	41,055	2,6	7,33	0,84	0,85	-0,002	ODZ0
44,55	40,84	2,34	7,46	0,84	0,86	-0,001	PMBK
44,528	40,753	2,64	7,35	0,93	0,95	-0,006	SHA0
44,526	41,831	0,26	5,81	0,4	0,41	-0,007	NICH
44,503	40,226	1,78	7,49	0,4	0,4	-0,006	NSSP
44,364	41,031	1,83	5,1	0,55	0,55	-0,012	STEP
44,287	40,381	1,79	7,48	0,43	0,44	-0,007	BUR0
44,287	40,381	1,95	6,48	0,76	0,78	-0,005	BUR4
44,276	40,736	1,33	7,56	0,47	0,48	-0,005	CHO0
44,276	40,736	1,18	6,19	0,77	0,78	-0,002	CHO4
GPS-сеть Грузии							
45,795	41,951	-0,2	4,4	0,45	0,46	-0,009	KUDI
44,826	41,377	2,55	5,54	1,84	1,57	-0,001	SHUL
44,19	41,185	1,14	5,53	0,92	0,93	-0,003	KIZ0
44,114	40,178	1,95	6,72	0,41	0,42	-0,02	MMOR
44,091	40,178	1,8	7,16	0,45	0,46	-0,005	MMR0
44,091	40,178	2,12	5,7	0,76	0,77	-0,004	MET4
43,954	40,609	1,44	6,93	0,41	0,51	-0,013	ARTI
43,951	40,108	2,4	6,07	0,77	0,78	-0,003	SA14
43,951	40,108	2,07	7,29	0,46	0,47	-0,005	SA10
43,891	41,537	0,3	3,75	0,73	0,95	-0,019	NINO
43,807	40,097	2,11	6,95	0,46	0,47	-0,006	SA20
43,807	40,097	1,89	5,81	0,77	0,79	-0,003	SA24
43,782	41,121	1,3	6,76	0,47	0,49	-0,004	BAV0
43,782	41,121	1,38	5,46	0,76	0,78	-0,003	BAV4
43,768	40,972	0,69	6,54	0,54	0,55	-0,01	AMSI
43,759	38,997	-0,84	11,26	4,96	0,53	-0,003	MRAD
43,753	42,978	0,66	-1,16	1,46	1,5	-0,031	MATS

RHO – корреляционный фактор между E и N компонентами скорости.

На рис. 1 показана карта скоростей GPS-пунктов для Азербайджана и сопредельных территорий (внесенных в таблицу), 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, которые были тщательно измерены, показаны в рамке Евроазиатской 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).

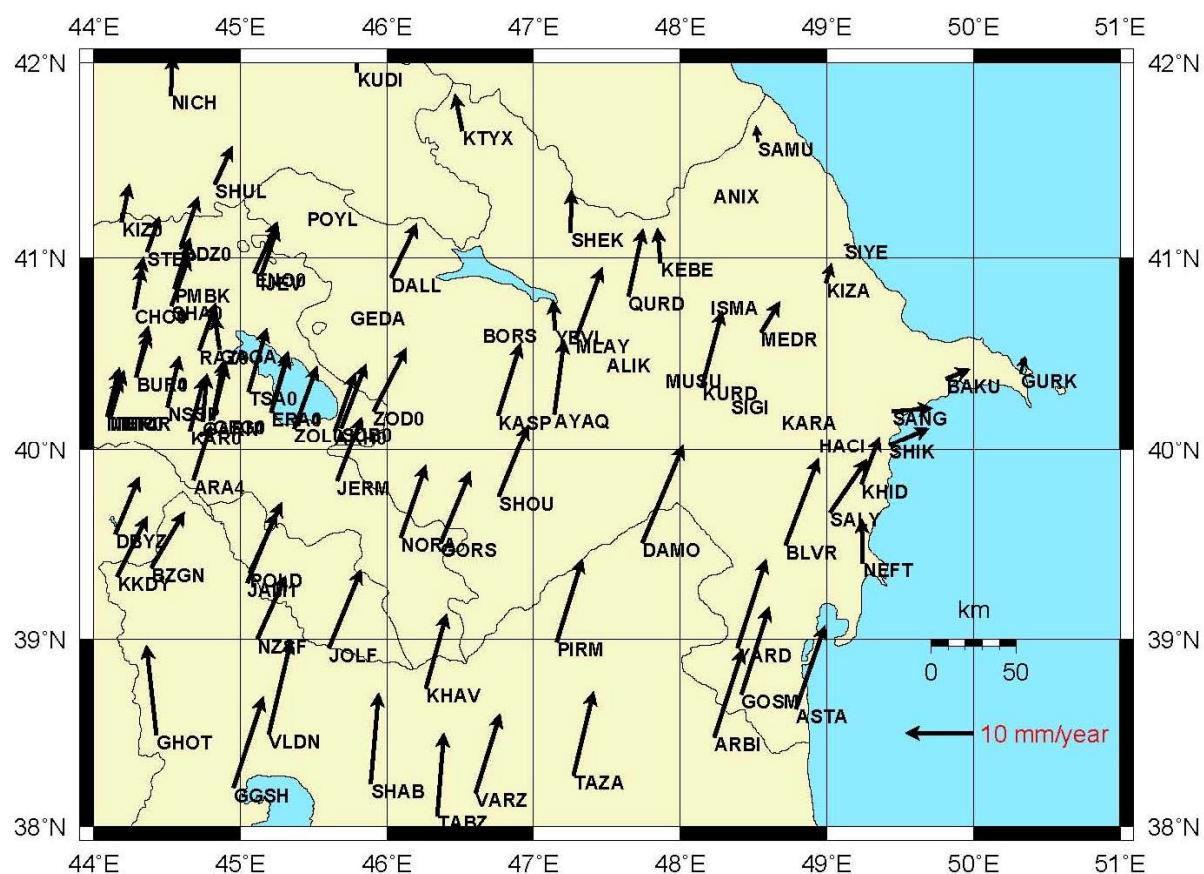


Рис. 1. Карта GPS-скорости исследуемой территории. Данные о скоростях пунктов, находящихся вне территории Азербайджана, взяты из работ Reilinger et al. (2006); Masson et al. (2006); Nilforoushan et al. (2003)

В широком масштабе 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 KURD и MEDR, и BILE и SHIK). Пункты GPS-наблюдений вдоль ГКН показывают уменьшение скорости. С-СВ движение земной поверхности мы интерпретируем как одну из причин накопления напряжений на этом надвиге. Кроме того, здесь имеется тенденция горизонтального движения в пределах Куриńskiej депрессии и Малого Кавказа, где увеличивается скорость с запада на восток вдоль простирации горной цепи.

Метод вычисления деформаций земной коры

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 горизонтальных компонент современных движений земной поверхности, возможно, оценить плоскую деформацию – состояние деформации, при котором одна из

главных деформаций постоянна. 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 (Shen et al., 1996) с использованием программы Sagiya et al. (2000).

Суть метода заключается в следующем: компоненты горизонтальной скорости смещения (u, v), компоненты тензора скорости деформации ($\dot{e}_{xx}, \dot{e}_{xy}, \dot{e}_{yy}$) и скорость вращения ω в произвольной точке с координатами (x, y) связаны со скоростью смещения (U, V) в точке наблюдения (X, Y) как:

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

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

где $\Delta x_i = X - x_i$; $\Delta y_i = Y - y_i$; σ_x^i – ошибка измерений компоненты X скорости смещения; σ_y^i – ошибка измерений компоненты Y скорости смещения; D – параметр, контролирующий вес измерения (Distance Decaying Constant, DDC); $\dot{e}_{xy} = \frac{1}{2}(\partial u / \partial y) + (\partial v / \partial x)$.

Значение DDC зависит от сети точек наблюдений, скорости смещения и тектонических особенностей региона. Скорость дилатации в каждой точке вычисляется следующим образом:

$$\Delta = \dot{e}_{xx} + \dot{e}_{yy} \quad (3)$$

При вычислении компонент скорости деформации и скорости вращения в i -ой точке

используются данные векторов всех соседних точек, расположенных в радиусе 2DDC от нее. В данном случае параметр D составлял около 35 км. При этом ε_x^i и ε_y^i играют роль весовых коэффициентов при решении системы уравнений, построенной согласно (1). Чем дальше от текущей точки находится пункт GPS-измерений, тем меньшее влияние он оказывает на результат решения системы уравнений для данной точки.

Анализ деформационного состояния исследуемой территории

Распределения деформаций для исследуемой территории, вычисленные по методике Шена (Shen et al., 1996), приводятся на рис. 2. Сплошные черные линии показывают направления оси сжатия, а белые – растяжения. Из анализа рисунка следует, что хотя доминирующим режимом является сжатие, деформации земной коры территории Азербайджана распределены неравномерно.

Сжатия наблюдаются на Большом Кавказе, в Гобустане, Куиринской впадине, Нахчыванской АР и приграничных с Ираном районах. Оси сжатия показывают, что сокращение земной коры в регионе Большого Кавказа происходит в направлении С-СВ, причем оно в районе Шамахи (MEDR) почти субмеридиональное. Максимальное значение скорости деформации (порядка $400 \cdot 10^{-9}$ в год) наблюдается в районе между пунктами KHID (Хыдырлы) и SHIK (Шыхлар), и здесь ось сжатия резко меняет направление и ориентируется в ЮЗ-СВ направлении (на юге Гобустанской и северной части Нижне-Куиринской структурных зон). В районе Сальян, Билясувар и Нефчала ось сжатия также резко меняет направление.

Из рис. 2 видно, что в деформационном поле наряду с областями сжатия проявились зоны, где деформации практически отсутствуют (величина скорости дилатации меньше $5 \cdot 10^{-9}$ в год). К таким зонам относятся Прикаспийско-Губинский район (ANIX, SAMU) и северная часть Гобустана (или восточная часть Загатала-Говдагской структурной зоны) (Геология Азербайджана, 2005). В этих зонах растяжение почти компенсируется сжатиями.

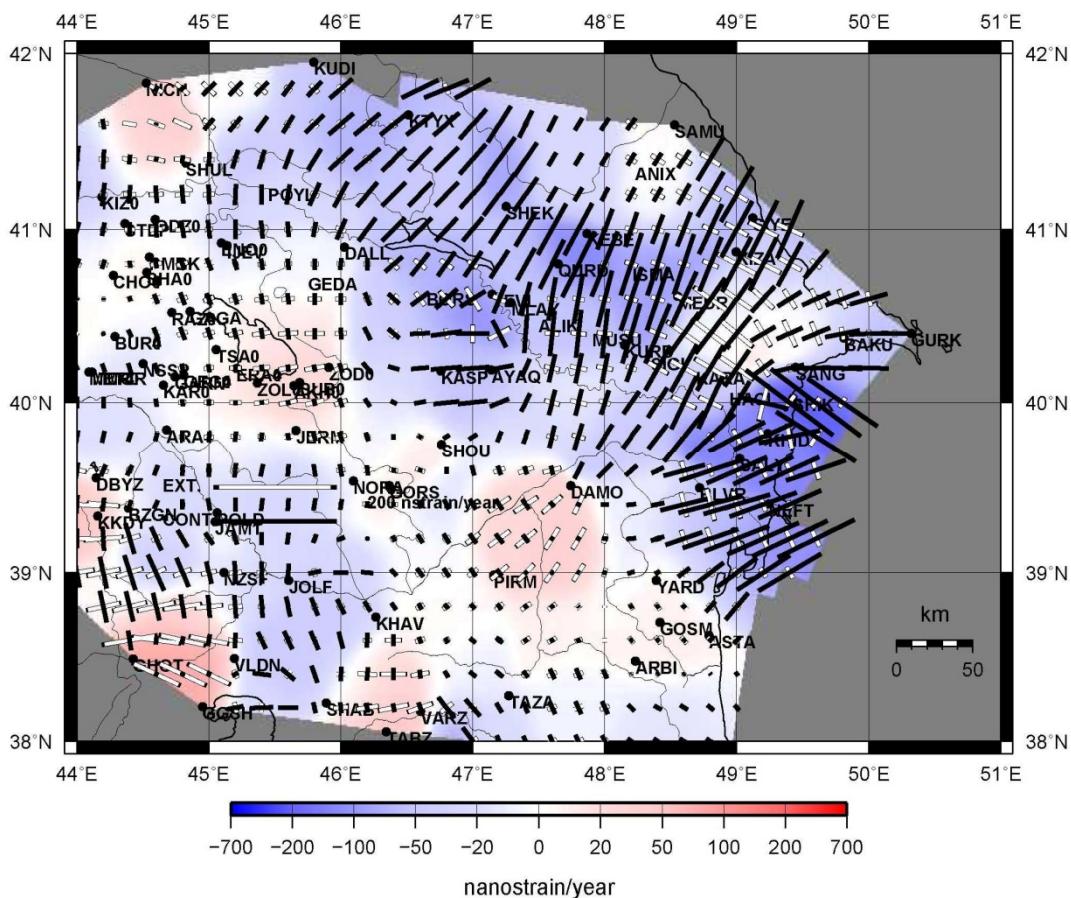


Рис. 2. Расположение осей сжатия/растяжения и поле скорости дилатации по данным GPS. Сплошные черные линии – оси сжатия; белые – оси растяжения (nanostrain - 10^{-9})

Зоны растяжения наблюдаются на Малом Кавказе: в Гядабейском (GEDA), Шушинском (SHOU) районах и в зоне, расположенной между пунктами DAMO и PIRM. В этих зонах величина скорости дилатации достигает значений до $100 \cdot 10^{-9}$ в год. Выявленный неоднородный характер деформационного поля региона позволяет констатировать блочную модель строения региона, близкую к действительности. Аналогичный вывод о блочном строении получен также для других регионов (Костюк и др., 2010). Для решения задачи выявления границ микроплит необходимо увеличение числа станций GPS-наблюдений.

На рис. 3 показано распределение сейсмических событий с $M \geq 4$, произошедших в 1998-2012 гг., и скорости деформации.

Распределение эпицентров построено с использованием материалов Республикан-

ского 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. сильные землетрясения с $M \geq 6$ происходили в зонах градиентов скорости деформации. Эти зоны расположены на юге Абшеронского полуострова в Каспийском море и на севере Ирана.

Пространственное распределение землетрясений с $M \leq 6$ указывает, что их местоположение также в основном совпадает с градиентными зонами поля деформации на поверхности Земли.

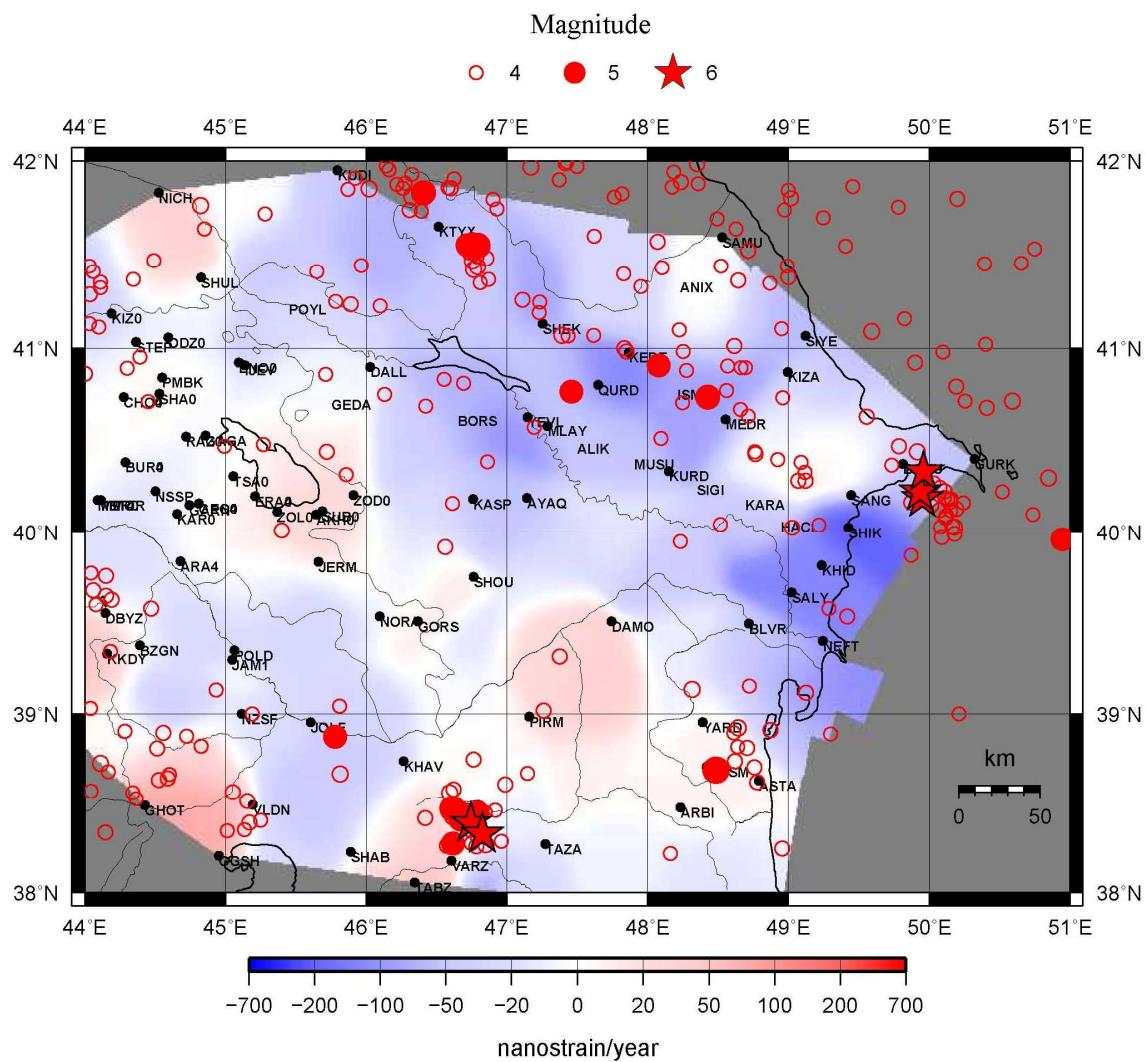


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений с $M \geq 4$ и поле скорости деформации (1998-2012 гг.)

Выводы

Изучение GPS-скорости территорий Азербайджана и соседних стран – Ирана, Грузии и Армении – позволило выявить неоднородный характер деформационного поля региона. Этот факт позволяет констатировать близость блочной модели строения региона к действительности. Увеличение числа станций GPS-наблюдений будет способствовать детализации деформационного поля и выявлению границ микроплит.

Выделена зона сжатия, протянувшаяся через весь Большой Кавказ, с осью сжатия юг-северо-восточного направления. Этую зону окружают участки, испытывающие растяжение, или участки, где деформации прак-

тически отсутствуют.

Максимальное значение скорости деформации растяжения (порядка $400 \cdot 10^{-9}$ в год) наблюдается в районе между пунктами KHID (Хыдырлы) и SHIK (Шыхлар), и здесь ось сжатия резко меняет направление и ориентируется в ЮЗ-СВ направлении.

В деформационном поле, наряду с областями сжатия, проявились зоны, где деформации практически отсутствуют. К таким зонам относятся Прикаспийско-Губинский район и северная часть Гобустана.

Зоны растяжения наблюдаются на Малом Кавказе: в Гядабейском, Шушинском районах и на приграничной с Ираном территории. В этих зонах величина скорости дилатации достигает значений до $100 \cdot 10^{-9}$ в год.

Пространственное распределение землетрясений с $M \geq 4$ указывает, что их местоположение в основном совпадает с градиентными зонами поля деформации на поверхности Земли.

Благодарности

Авторы признательны Р.Реилингеру и Р.Кингу за полезные дискуссии при обсуждении результатов работы. При построении рисунков использовались программные обеспечения GMT (Wessel and Smith, 1995). Также авторы выражают признательность проф. Т.Сагие (Научно-исследовательский центр землетрясений и извержений вулканов, Высшая школа экологических исследований, Нагойский Университет, Япония) и благодарят сотрудников BRI/IISSEE/LICA/JICE г. Цукуба за всестороннюю помощь при ознакомлении с программой расчета.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики - Грант № EIF-2010-1(1)-40/18-М-21.

ЛИТЕРАТУРА

- ГЕОЛОГИЯ АЗЕРБАЙДЖАНА. 2005. Том IV – Тектоника. Nafta-Press. Баку. 506с.
- КОСТЮК, А.Д., СЫЧЕВА, Н.А., ЮНГА, С.Л., БОГОМОЛОВ, Л.М., ЯГИ, Ю. 2010. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии. *Физика Земли*, 3, 52-65.
- ALLEN, M., JACKSON, J., WALKER, R. 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates, *Tectonics*, 23, doi: 10.1029/2003TC001530.
- DONG, D., HERRING, T.A., KING, R.W. 1998. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *J. Geodesy*, 72, 200-211.
- HERRING, T.A. 2004. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program version 4.1. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. MA.
- JACKSON, J. 1992. Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey, *J. Geophys. Res.*, 97, 12471-12479.
- KADIROV, F.A. 2004. Gravity model of lithosphere in the Caucasus-Caspian Region, (in) South Caspian Basin: Geology, geophysics, oil and gas content. Nafta Press. Baku.
- 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.
- 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.
- KING, R.W., BOCK, Y. 2004. Documentation of the MIT GPS analysis software: GAMIT. Mass. Inst. of Technol. Cambridge.
- MASSON, F., VAN GORP, S., CHERY, J., DJAMOUR, Y., TATAR, M., TAVAKOLI, F., NANKALI, H., VERNANT, P. 2006. Extension in NW Iran Driven by the Motion of the South Caspian Basin, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 252, 180-188.
- McKENZIE, D.P. 1972. Active tectonics of the Mediterranean region, *Geophys. J. R. Asron. Soc.*, 30, 239-243.
- 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.
- 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.
- PHILIP, H., CISTERNAS, A., GVISIANI, A., GORSHKOV, A. 1989. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision, *Tectonophysics*, 161, 1-21.
- REILINGER, R., McCLUSKY, S., ARRAJEHI, 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.
- REILINGER, R. and 22 others. 2006b. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *J. Geophys. Res.*, B05411, doi:10.1029/2005JB004051.
- ROBERTSON, A.H.F. 2000. Mesozoic-Tertiary tectonic evolution of a south Tethyan ocean basin and its margins in southern Turkey. In: *Tectonics and magmatism in Turkey and the surrounding area*. Geol. Soc. Spec. Pub. London, 173, 97-138.
- SAGIYA, T., MIYAZAKI, S., TADA, T. 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *PAGEOPH*, 157, 2303-2322.
- SENGOR, A.M.C., GORUR, N., SAROGLU, F. 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: *Strike-slip faulting and basin formation*. Society of Econ. Paleont. Min. Sec. Pub., 37, 227-264.
- 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), 2795727980. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB02544>.
- WESSEL, R., SMITH, W.H.F. 1995. New version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans AGU*, 76, 329.