

УДК 550.34.034

Современные горизонтальные движения тектонических блоков земной коры Азербайджана по данным глобальной системы позиционирования (GPS) сети РЦСС

© 2023 г. Г.Дж. Етирмишли, И.Э. Казымов

РЦСС при НАНА, г. Баку, Азербайджан

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

Аннотация. С целью выявления скоростей горизонтальных движений и направления движения отдельных тектонических блоков земной коры, в Республиканском центре сейсмологической службы Азербайджана (РЦСС при НАНА), начиная с 2012 г., было принято решение создать сеть GPS-станций. С учётом геоморфологии, геотектоники, рельефа и учитывая влияние внешних факторов, в различных регионах Азербайджана были выбраны места для строительства новых GPS-станций. Эта новая мониторинговая система состоит из 24 GPS-станций фирмы «Trimble» (США) с центром обработки и анализа в г. Баку, куда в режиме «online» поступают все данные со всех регионов, где были установлены станции. Впервые в мире GPS-станция была установлена на сверхглубокой Саатлинской скважине (8324 м) на территории Азербайджанской Республики в районе Саатлы. На основе данных космической геодезии GPS и сейсмологических данных были проанализированы современные геодинамические условия территории Азербайджана за 2020–2021 гг. Наиболее важной особенностью поля скоростей горизонтальных движений является уменьшение значений скоростей перпендикулярно направлению простираения Большого Кавказа с юга на север. Поле скоростей чётко иллюстрирует движение земной поверхности в север–северо-восточном направлении. Кроме того, в пределах Среднекуринской впадины и на Малом Кавказе наблюдается тенденция к горизонтальному смещению, отражающаяся в увеличении скорости движения с запада на восток по продолжению хребта. Установлено, что на Апшеронском полуострове земная кора укорачивается со скоростью ~5 мм/год. Установлено, что в 2020 г. максимальные значения горизонтальных скоростей были отмечены на станциях «Агдам», «Лерик», «Ленкорань», «Джалилабад», «Физули» и «Саатлы», а среднее значение скоростей по всей территории республики составило 7.3 мм/год.

Ключевые слова: Азербайджан, спутниковая геодезия, организация наблюдений, методика обработки данных, современные движения земной коры.

Для цитирования: Етирмишли Г.Дж., Казымов И.Э. Современные горизонтальные движения тектонических блоков земной коры Азербайджана по данным глобальной системы позиционирования (GPS) сети РЦСС // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.01>. – EDN: EPFCMZ

Введение

Согласно теории тектоники плит, земная кора состоит из подвижных блоков, постоянно смещающихся относительно друг друга. Плиты движутся значительно быстрее мелких блоков, поэтому для изучения их динамики используется сравнительно небольшое количество базовых станций. Тип сеймотектонического деформирования земной коры Кавказа соответствует обстановке надвигообразования и согласуется с развиваемыми в плитотектонической кон-

цепции представлениями о сильном поперечном сужении кавказского сегмента Альпийско-Индонезийского подвижного пояса в результате сближения Аравийской и Евразийской литосферных плит [Lukk, Shevchenko, 2019]. Геодезические (GPS) измерения на территории Большого Кавказа проводились в 1991–1997 гг. [Prilepin et al., 1997; Shevchenko et al., 1999] и на территории осетинской части Большого Кавказа в 2010–2013 гг. [Milyukov et al., 2015; Shevchenko et al., 2014; Шевченко и др., 2017; Kadirov et al., 2014].

Обычное движение плиты может быть описано как вращение относительно точки на блоке, точки вне его или как комбинация этих типов движения. Для исследования движений блоков земной коры в первую очередь устанавливаются базовые GPS-станции, которые должны быть чётко зафиксированы и не подвергаться внешнему воздействию, способному хотя бы минимально повлиять на их расположение. В 2012 г. в РЦСС при НАНА был создан отдел «Геодинамика». Учитывая геоморфологию, геотектонику, топографию и влияние внешних факторов в различных регионах страны, было выбрано место для строительства новых станций GPS.

Таким образом, настоящая статья посвящена исследованию современных горизонтальных движений тектонических блоков земной коры на основе анализа данных спутниковых геодезических наблюдений на территории Азербайджана.

Структура и базовые элементы GPS-станций

Совокупность из 24 GPS-станций покрывает обширную территорию Азербайджана и формирует геодезическую сеть GPS_РЦСС (таблица, рис. 1, 2). Регулярные наблюдения ведутся с 2013 г. сотрудниками отдела Геодинамики, с использованием программы GAMIT/GLOBK проводится обработка GPS-данных на основе современных методик. С 2012 г. по настоящее время создана база данных GPS-измерений. База данных содержит результаты расчётов смещений GPS-станций, расположенных в различных регионах территории Азербайджана. Данные представлены в виде временных рядов смещения в широтном и меридиональном направлениях и изменений высот пунктов, а также в виде графических файлов. Отметим, что впервые в мире на территории Азербайджанской Республики в Саатлинском районе сотрудниками отдела Геодинамики РЦСС на Саатлинской сверхглубокой скважине (8324 м) СГ-1 была установлена GPS-станция [Kazimov, Kazimova, 2019; Yetirmishli et al., 2021].

Таблица. Координаты базовых GPS-станций Азербайджана, установленных РЦСС при НАНА

№	Регион	Код станции	X (м)	Y (м)	Z (м)	φ, N			λ, E			Эллипсоид, м	Геоид, м
						°	"	'	°	"	'		
1	Нардаран	NRDG	3119056	3715315	4127223	40	34	52	49	59	10	16	34
2	Физули	FZLG	3342798	3625230	4031993	39	27	36	47	19	16	195	185
3	Габал	GBLG	3238749	3576506	4158307	40	56	45	47	50	14	650	645
4	Джалилабад	GLBG	3284509	3698554	4013287	39	14	33	48	23	36	133	128
5	Гобустан	GBSG	3188769	3660855	4123879	40	32	7	48	56	34	819	826
6	Исмаиллы	IMLG	3224614	3604282	4145450	40	47	33	48	10	56	698	695
7	Ленкорань	LKRG	3283996	3748510	3967258	38	42	35	48	46	45	42	38
8	Лерик	LRKG	3316454	3727631	3962441	38	38	35	48	20	26	1583	1572
9	Пиргулу	PQLG	3199225	3628012	4145591	40	47	17	48	35	38	1459	1459
10	Газах	QZXG	3383720	3428022	4167689	41	3	31	45	22	21	544	529
11	Гусар	QSRG	3184300	3569364	4205835	41	30	55	48	15	48	607	608
12	Саатлы	SATG	3251875	3661664	4072626	39	56	13	48	23	32	-7	-7
13	Хыналыг	XNQG	3209493	3582006	4178113	41	10	19	48	8	22	1976	1971
14	Ярдымлы	YRDG	3309925	3707435	3985538	38	54	53	48	14	32	909	899
15	Закагала	ZKTG	3278995	3470076	4215884	41	38	14	46	37	18	475	465
16	Агдам	AGDG	3324852	3579183	4087161	40	6	24	47	6	24	159	150
17	Алтыгагач	ATGG	3173815	3642980	4151433	40	51	37	48	56	14	1121	1126
18	Ширван	ALIG	3211520	3695158	4074453	39	57	30	49	0	20	36	45
19	Гала	GALG	3115950	3733978	4112772	40	24	37	50	9	20	0	19
20	Гедабек	GDBG	3378501	3468627	4140108	40	43	17	45	45	15	1645	1628
21	Гобу	GOBG	3143976	3711501	4112089	40	24	2	49	43	57	190	206
22	Жилой ост.	JLVG	3092713	3762132	4104636	40	18	52	50	34	39	-42	-21
23	Мингечевир	MNGG	3293694	3542605	4143345	40	46	20	47	5	7	66	60
24	Гянджа	GANG	3347100	3505286	4133077	40	38	48	46	19	21	542	529

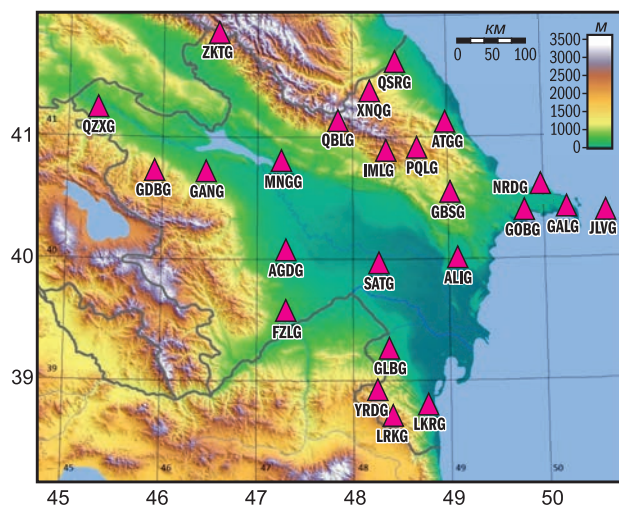


Рис. 1. Карта расположения 24 базовых GPS-станций РЦСС при НАНА на территории Азербайджана



Рис. 2. Внешний вид GPS-станций, установленных на территории Азербайджана

Координаты базовых станций были предварительно рассчитаны на сервере AUSPOS (Australia's free online Global Positioning System) (рис. 3).

Состав оборудования станции сети РЦСС

Сеть базовых станций представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из постоянно работающих приёмников спутниковых сигналов с жёстко фиксированными антеннами, объединённых каналами связи с вычислительным центром, как показано на рис. 4.

Подключение GPS-приёмника к серверному центру осуществляется высокоскоростным Интернет-провайдером для обеспечения как *прямой, так и обратной связи* от компании «Delta Telekom LTD». Несомненными достоинствами выбранного состава оборудования станций являются автономность, наличие резервных источников питания, подавление многолучевого приёма сигнала за счёт выбора специализированных антенн, прецизионный приёмник ГНСС сигналов и др. (рис. 5).

Сеть коммуникаций связывает 24 базовые станции с вычислительным центром и обеспечивает доступ пользователя к данным сети. Вычислительный центр — это программно-аппаратный комплекс, предназначенный для управления сетью станций, сбора и архивации данных сети, а также выдачи пользовательскому сектору координатно-временной информации как для режима постобработки, так и для работы в режиме, близком к реальному времени. Пользовательский сектор — это потребители координатно-временной информации, обладающие сетью приёмников спутниковых сигналов различного типа и назначения.

Trimble NetR9 Geospatial Base — 440-канальный GNSS-приёмник, разработанный специально для использования в качестве базовой станции в сетях постоянно действующих базовых станций. Станции оснащены антеннами модели Choke Ring, количество установленных станций этой модели — десять, Zephyr Geodetic2 — 14, приёмников Trimble Net R9 — 24, регистрирующих сигналы соответствующих спутников GPS

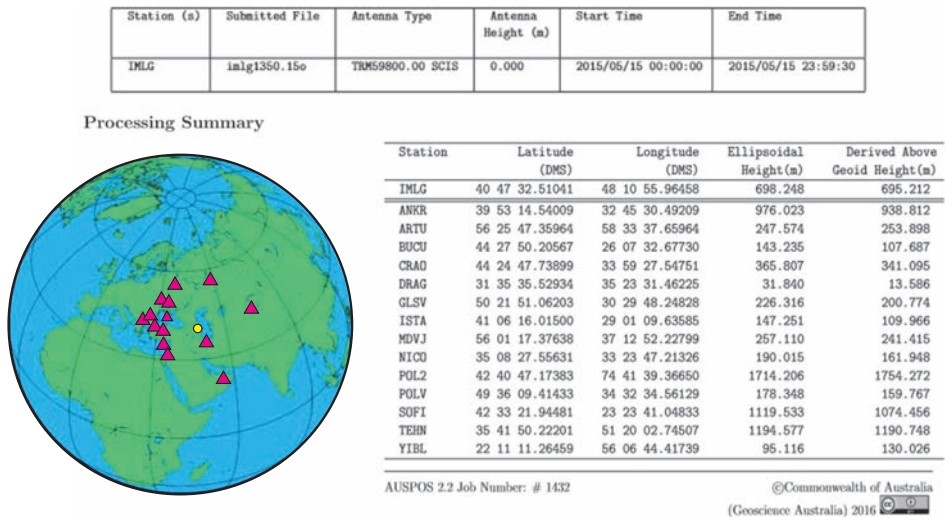


Рис. 3. Пример результата обработки данных с использованием сервиса AUSPOS [Beutler et al., 1994]

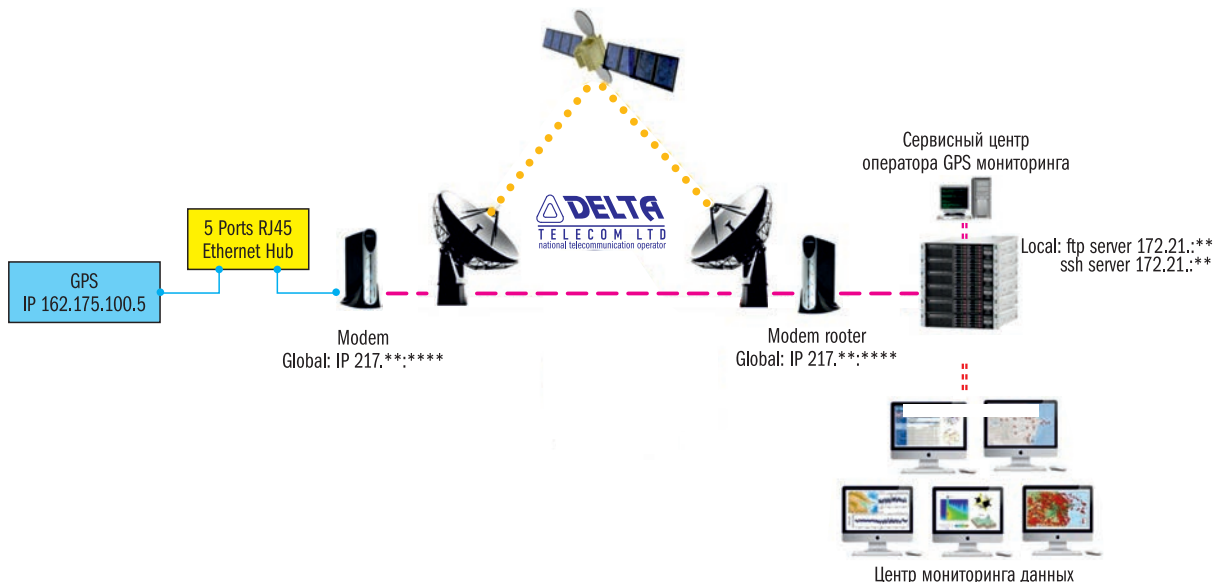


Рис. 4. Структура сети GPS-станций РЦСС при НАНА

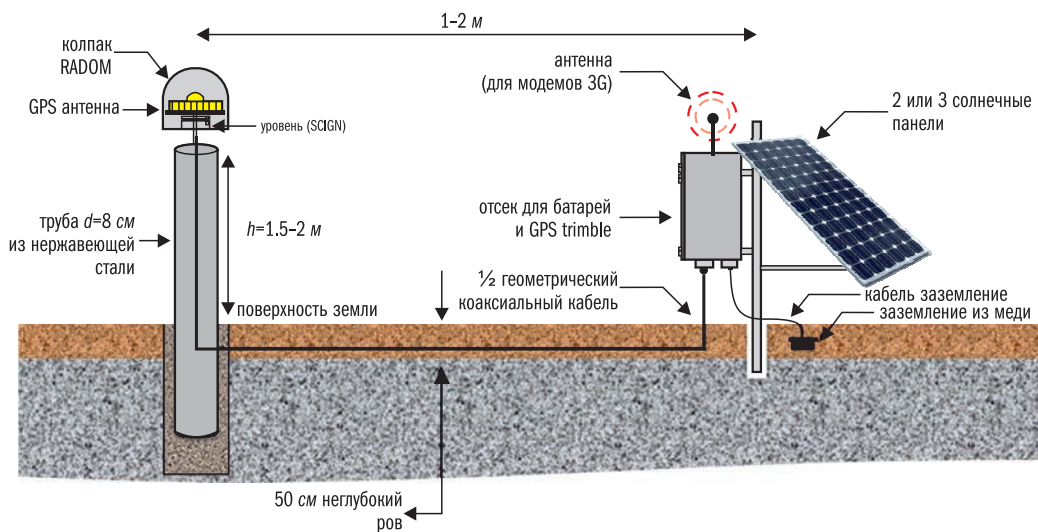


Рис. 5. Схема базовой станции РЦСС при НАНА

и GLONASS. Использование двух GNSS-чипов Trimble Maxwell 6 в сочетании с технологиями Trimble R-Track, Trimble 360, Trimble EVEREST, а также проверенной технологией отслеживания спутников с малыми углами возвышения и собственной системой обнаружения/отбраковки деградированных сигналов (RAIM) обеспечивает Net R9 Geospatial Base непревзойдённую точность позиционирования и производительность (рис. 6).

Приёмник способен отслеживать сигналы всех существующих сейчас спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo) на всех возможных частотах и имеет возможность настройки на приём дополнительных сигналов, которые могут стать доступными в будущем. Прочный, отлично защищённый (IP67), компактный, многофункциональный, имеющий низкое энергопотребление Trimble Net R9 может применяться для широкого круга геодезических работ, требующих высокой точности. Trimble Net R9 имеет 8 ГБ (4 ГБ) встроенной памяти. Возможно расширение памяти до 1 ТБ посредством внешнего USB-устройства. Запись данных может производиться в формате T02, RINEX v2.11, RINEX v3.0, BINEX и Google Earth KMZ с частотой до 50 Гц. Одновременно могут записываться восемь независимых сессий. Встроенный литий-ионный аккумулятор обеспечивает непрерывную работу NetR9 Geospatial Base в течение 15 час и может использоваться как основной или как аварийный резервный источник питания. Диапазон рабочих температур от -40 до $+65$ °С.

Методика вычислений

Для наблюдения за изменениями земной поверхности, вызванными геодинамическими

процессами, на протяжении ряда лет успешно, как указано выше, применяются GPS-приборы. Высокоточные GPS-измерения практически любых линий проводятся на основе дифференциального метода с использованием так называемых базовых GPS-станций. В этом случае во время измерений один спутниковый приёмник-базовая станция постоянно находится в точке с известными координатами. Анализ данных GPS-станций был проведён с использованием программного обеспечения GAMIT/GLOBK версии 10.71 [Herring *et al.*, 2018]. В основу оценки скоростей положен анализ временных рядов координат GPS-станций, вычисляемых из первичных данных, которые представляют собой наборы фазовых и кодовых измерений на двух частотах продолжительностью 24 час с интервалом регистрации 15 с. Для оценки скоростей определяемых станций необходимо наличие в сети хотя бы одного пункта, а желательно – нескольких. Для получения устойчивого решения и точной привязки региональных измерений к международной системе координат ITRF2014 [Altamimi *et al.*, 2016] в обработку были включены ещё 11 станций Международной службы IGS (International GNSS Service): ARTU («Арти», Россия), GANP («Гановче», Словакия), TEHN («Тегеран», Иран), POLV («Полтава», Украина), MDVJ («Менделеево», Россия), ANKR («Анкара», Турция), NICO («Никосия», Кипр), DRAG (Израиль), POL2 («Бишкек», Кыргызстан), YIBL («Ибал», Оман), BZGN («Базерган», Иран) (рис. 7) [Beutler *et al.*, 1994]. Угол отсечки по высоте был взят 10° .



Рис. 6. Элементы базовой GPS-станции: приёмник фирмы «Trimble Net R9», антенна «Zephyr» и «Choke ring», элементы уровня (Mount), аккумуляторный блок с одной гелиевой батареей 92 А×ч 110 В переменного тока, зарядное устройство на солнечной панели 80 Вт, двойная панель и кабель

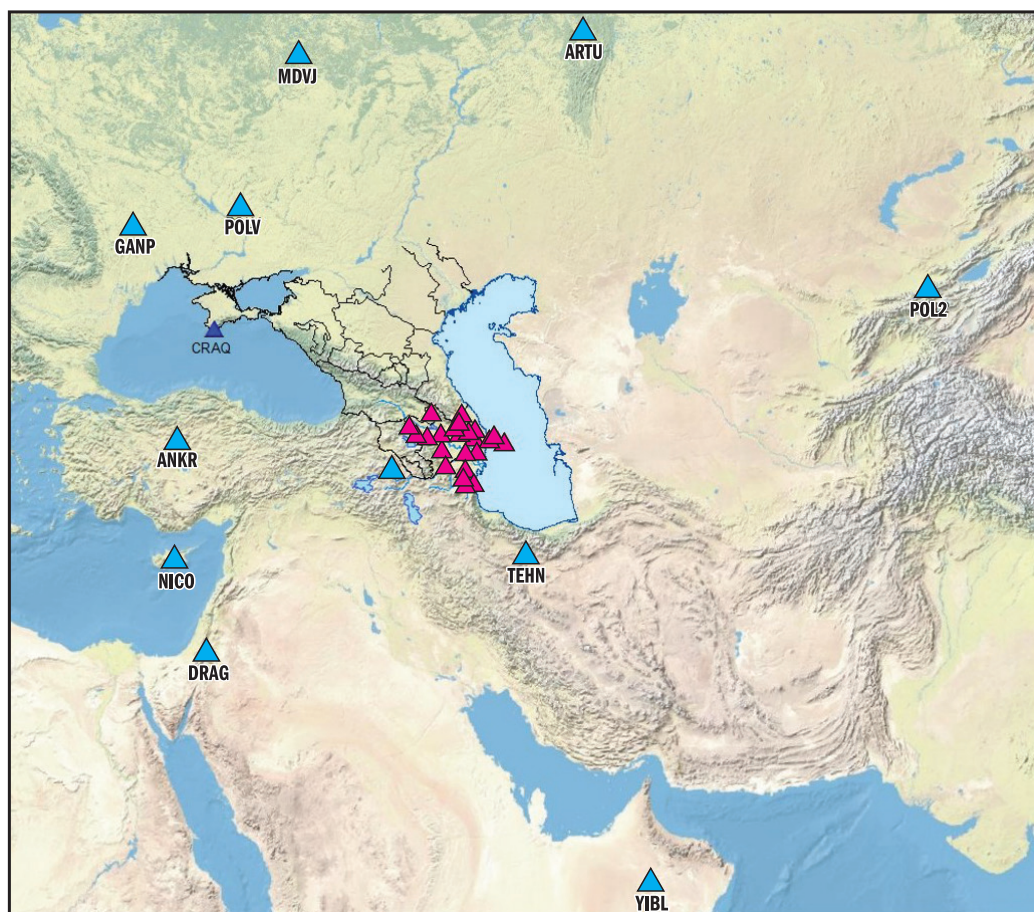


Рис. 7. Карта постоянных GPS-станций РЦСС при НАНА ($N=24$) и сети IGS ($N=11$)

Начальный этап включает предварительную подготовку файлов измерений в формате RINEX и проверку их качества в программе TEQC [IERS Conventions, 2010]. Для всех решений использовались высокоточные геоцентрические орбиты спутников, предоставляемые международной службой ГНСС (IGS). В результате работы пакета GAMIT создаются файлы контроля качества (q-файлы) и файл, содержащий координаты станции, атмосферную модель и матрицу ковариации станций (h-файл) (рис. 3). На этом этапе выполняется предварительная оценка координат с использованием взвешенного среднеквадратического отклонения (WRMS), которое должно быть лучше, чем 1.5 мм. Уточнение координат станций, их обработка с использованием фильтра Калмана проводится в программном пакете GLOBK [King et al., 2018; Herring et al., 2015]. Полученные горизонтальные и вертикальные значения скоростей станций включают медленно изменяющиеся локальные природные эффекты, такие как движение тектонических микролит, оседание почвы и др.

Автоматическая итерация в блоке GAMIT, использующая метод наименьших квадратов, выполняется до получения значений остатков априори заданных и оцениваемых координат на уровне первых миллиметров. При этом в программе «autcln» восстанавливаются или удаляются циклические сдвиги с использованием двойных или тройных разностей наблюдений [Estey, Wier, 2014]. Для каждого из спутников выполнена оценка широкополосной неоднозначности на уровне 95% с помощью комбинации Мельбурна-Вуббена [DeMets, 1994] и данных по смещению кода задержки спутников.

Для определения координат и скоростей исследуемых станций использовался программный комплекс GAMIT/GLOBK версии 10.71, разработанный в MIT (Massachusetts Institute of Technology), Harvard Smithsonian Center of Astrophysics и Scripps Institution of Oceanography. Основные этапы обработки данных в GAMIT/GLOBK приведены на рис. 8.

GPS-исследования на территории Азербайджана в 2020–2021 гг.

С целью определения скоростей и направлений горизонтальных движений отдельных тектонических блоков земной коры на территории Азербайджана был проведён анализ данных, полученных в 2020–2021 гг. на Апшеронском полуострове. Исследуемое поле скоростей было получено относительно системы ITRF с неподвижной Евразией.

Установлено, что в 2020 г. на Большом Кавказе среднее значение скоростей составляло 6.8 мм/год, на Малом Кавказе – 8.7 мм/год, на территории Средней и Нижней Куры – 7.6 мм/год, на территории Талышского региона – 9.8 мм/год, на Апшеронском полуострове – 3.7 мм/год. Максимальные значения горизонтальных скоростей были отмечены на станциях «Агдам», «Лерик», «Ленкорань», «Джалилабад», «Физули» и «Саатлы». Среднее значение скоростей по всей территории республики составило 7.3 мм/год.

В 2021 г. на территории Большого Кавказа среднее значение скоростей составляло 5.4 мм/год, на Малом Кавказе – 8.9 мм/год, на территории Средней и Нижней Куры – 8.8 мм/год, на территории Талышского региона – 11.6 мм/год, на Апшеронском п-ове – 4.2 мм/год. Среднее значение скоростей по всей территории республики составило 7.6 мм/год. Максимальные значения скоростей были отмечены на станциях «Ярдымлы» (12.2 мм/год), «Ленкорань» (13.1 мм/год) и «Саатлы» (12.3 мм/год). По сравнению с 2020 г. значения скоростей в 2021 г. уменьшились.

Рассмотрение данных по распределению векторов скоростей горизонтальных смещений GPS-станций на территории Азербайджана приводит к выводу о значительной скорости смещения в север–северо-восточном направлении юго-западного борта и центральной полосы Южно-Кавказской микроплиты, включая территорию юго-восточного сегмента Малого Кавказа, Куринской депрессии и Талыша (рис. 9, 10).

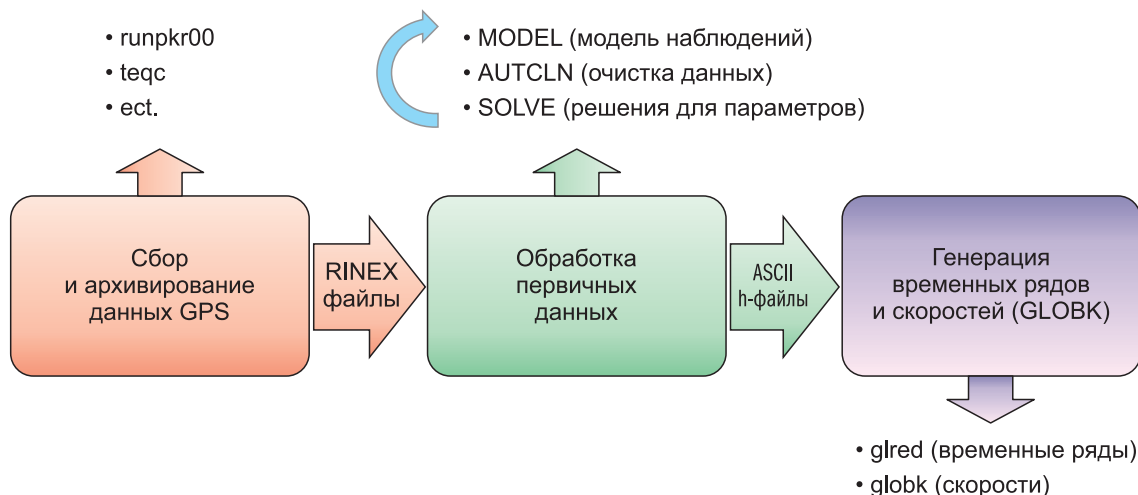


Рис. 8. Этапы обработки данных GPS в программе GAMIT/GLOBK

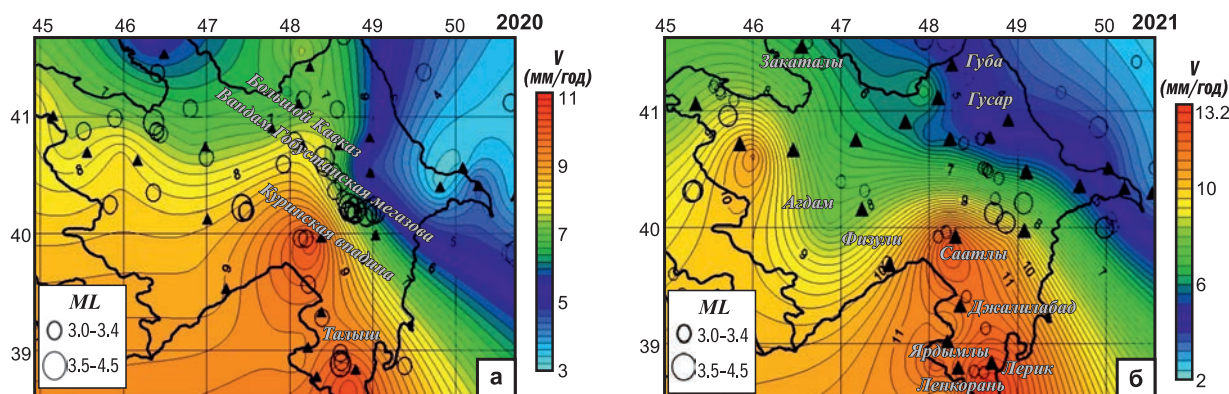


Рис. 9. Вариации поля скорости смещения земной поверхности и эпицентры землетрясений с локальной магнитудой $ML \geq 3.0$ за 2020 г. (а) и 2021 г. (б)

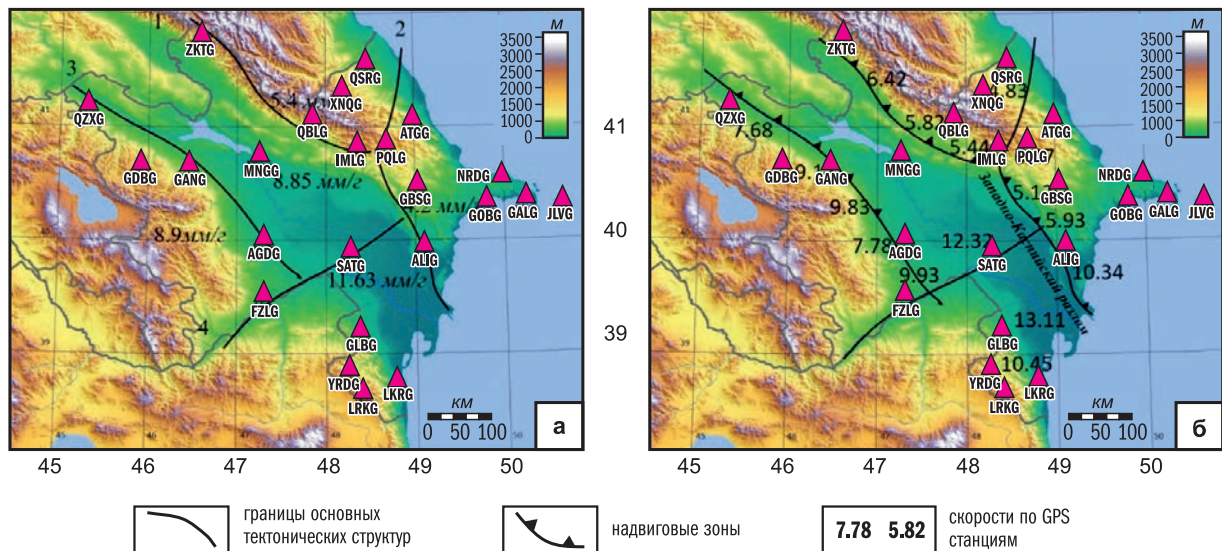


Рис. 10. Карты-схемы выделенных тектонических блоков: а – средние значения скоростей; б – аппроксимация значений скоростей горизонтальных движений с тектоническими разломами

Установлено, что вдоль Куринской депрессии в направлении от Среднекуринской впадины до Нижнекуринской (т.е. с северо-запада на юго-восток) наблюдается постепенное увеличение скоростей горизонтальных движений от 7.3 до 11.3 $мм/год$. Из анализа рисунка следует, что, хотя доминирующим режимом является сжатие, деформация земной коры территории Азербайджана распределена неравномерно. Уменьшение значений скоростей горизонтальных движений между Куринской впадиной и Большим Кавказом свидетельствует о сокращении мощности земной коры в регионе Большого Кавказа, происходящем в направлении юго-юго-запад–северо-северо-восток. Увеличение скоростей с запада на восток связано с влиянием Западно-Каспийского правостороннего разлома. Отметим, что в последние три года зона Нижнекуринской впадины характеризуется проявлением высокой сейсмической активности, выраженной в нескольких землетрясениях с магнитудой больше 5 со взбросовым типом подвижки [Kazimov, 2021].

В то же время в пределах северо-восточного борта микроплиты, отвечающего Вандам-Гобустанской мегазоне Большого Кавказа, векторы скоростей демонстрируют снижение до 10–12 $мм/год$, а ещё севернее, т.е. непосредственно в пределах аккреционной призмы, и вовсе до 3.5–5 $мм/год$. В целом тангенциальное сокращение земной коры в регионе оценивается в размере 6.1–11 $мм/год$. Подтверждением сказанному являются наблюдаемые направления и скорости движения земной поверхности

территории Азербайджана и смежных регионов по результатам измерений на GPS-пунктах. По результатам работ [Ulomov et al., 2006; Kangarli et al., 2018] установлено, что Скифская часть Скифско-Туранской плиты, занимающая равнинные территории Крыма и Предкавказья и ограниченная с севера Восточно-Европейской платформой, испытывает сжимающие усилия со стороны складчатых сооружений Большого Кавказа и Горного Крыма, новейшие и современные геодинамические движения которых обусловлены давлением со стороны Альпийского складчатого пояса, испытывающего напор Аравийской плиты. Этим же воздействием субмеридионального сжатия подвержена и южная часть Турана.

На GPS-станциях «Нардаран», «Гобу», «Гала» и «о-в Жилой», которые входят в Апшеронскую зону, прослеживаются почти схожие значения скоростей горизонтальных смещений (3.8, 4.9, 4.1 и 3.2 $мм/год$ соответственно). В направлении от Талышского региона до Апшеронского полуострова (юго-западное–северо-восточное направление) наблюдается заметное уменьшение северной компоненты скоростей смещения по сравнению с высокими значениями пунктов, расположенных в юго-западной части выбранного профиля (LKRГ_GPS=13.8 $мм/год$, LRK_GPS=12.5 $мм/год$, GLBG_GPS=12.3 $мм/год$, YRDG_GPS=12.7 $мм/год$). Нужно отметить заметное увеличение азимутальных углов апшеронских станций, свидетельствующих о движении по часовой стрелке в направлении на восток–юго-восток до 88°.

Таким образом, учитывая вышесказанное, мы выделили несколько тектонических блоков по крупным тектоническим разломам, отличающихся между собой значением скоростей горизонтальных движений: Артвин-Гарабахская мегазона Малого Кавказа, Среднекуринская мегазона, мегазона южного склона Большого Кавказа, Талышская мегазона [Геология Азербайджана, 2005] (рис. 10).

Интересно отметить, что скорость современных вертикальных движений GPS-пунктов «Габала», «Закаталы», «Гусар» и «Хыналыг» на южном склоне Большого Кавказа отстаёт от скорости общего поднятия. Современные движения вдоль линии, протягивающейся от Малого до Большого Кавказа (с юга на север), обладают волновой природой, которая является результатом интерференции различных тектонических волн, т.е. результатом сложного сочетания горизонтальных и вертикальных движений земной коры (возможно, асимметрия её движений обусловлена одновременным проявлением волн с различными длинами и амплитудами).

Заключение

Таким образом, глобальная система позиционирования (GPS) предоставила новую возможность прямого наблюдения за современными движениями и деформациями земной коры.

Сравнение полученных результатов GPS-станций показывает, что станции, расположенные на Малом Кавказе и в зоне Талышских гор, смещаются в северо-восточном направлении почти идентично. Эти факты позволяют констатировать, что Малый Кавказ и Талыш в горизонтальном движении участвуют единым блоком. С другой стороны, станции, расположенные на территории Талышских гор, характеризуются большими значениями скоростей горизонтальных движений, что позволяет нам оконтурить данный регион со средними значениями скоростей горизонтальных движений 11.6 мм/год.

Поле скоростей чётко иллюстрирует движение земной поверхности в север–северо-восточном направлении. Данное явление отражает процесс последовательного накопления упругих деформаций в зоне субдукционного взаимодействия структур северного борта Южно-Кавказской микроплиты (Вандам-Гобустанская мегазона) с аккреционной призмой Большого Кавказа.

Кроме того, в пределах Среднекуринской впадины и на Малом Кавказе наблюдается тенденция к горизонтальному смещению, отражающаяся в увеличении скорости движения с запада

на восток по продолжению хребта. Установлено, что на Апшеронском полуострове земная кора укорачивается со скоростью ~5 мм/год. С этим явлением возможно связана активизация сейсмических событий и грязевых вулканов в данном регионе.

Установлено, что в 2020 г. максимальные значения горизонтальных скоростей были отмечены на станциях «Агдам», «Лерик», «Ленкорань», «Джалилабад», «Физули» и «Саатлы», а среднее значение скоростей по всей территории республики составило 7.3 мм/год. В 2021 г. среднее значение скоростей по всей территории республики составило 7.6 мм/год. Максимальные значения скоростей были отмечены на станциях «Ярдимлы» (12.2 мм/год), «Ленкорань» (13.1 мм/год) и «Саатлы» (12.3 мм/год).

Вдоль Куринской депрессии в направлении от Среднекуринской впадины до Нижнекуринской (т.е. с северо-запада на юго-восток) наблюдается постепенное увеличение скоростей горизонтальных движений от 7.3 до 11.3 мм/год. В направлении от Талышского региона до Апшеронского полуострова (юго-запад–северо-восточное направление) наблюдается заметное уменьшение северной компоненты скоростей смещения по сравнению с высокими значениями пунктов, расположенных в юго-западной части выбранного профиля (LKRГ_GPS=13.8 мм/год, LRK_GPS=12.5 мм/год, GLBG_GPS=12.3 мм/год, YRDG_GPS=12.7 мм/год).

Таким образом, тенденция горизонтальных движений, происходящих на территории Азербайджана, предопределяет активизацию сейсмических процессов в зонах перехода значений скоростей от высоких к относительно низким. В результате всеобщего сжатия преобладают механизмы очагов типа взброс, взброс–надвиг. Причиной современной геодинамики Азербайджанского региона является приближение в субмеридиональном направлении Аравийской литосферной плиты к смежной окраине Восточно-Европейской части Евразийской литосферной плиты. Эта концепция сближения предполагает, что в результате кавказский сегмент Альпийско-Гималайского подвижного пояса сжимается, слои осадочных и вулканических пород сминаются в складки, блоки основания испытывают разнонаправленные смещения, а верхние горизонты коры нарушаются взбросами и надвигами. Для выявления более детальной геодинамической картины необходима более плотная геодезическая сеть, которая позволит получить более детальную картину распределения современных горизонтальных движений.

Литература

- Геология Азербайджана*. В 7 т. Т. IV. Тектоника / Гл. ред. В.Е. Хайн и Ак.А. Ализаде. – Баку: Nafta-Press, 2005. – 505 с.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В.* Автономная и плиттктоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений. – М.: ГЕОС, 2017. – 612 с. – EDN: WCEWOD
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.* ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modelling nonlinear station motions // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 2016. – V. 121. – P. 6109–6131. DOI: 10.1002/2016JB013098
- Beutler G., Brockmann E., Gurtner W., Hugentobler U., Mervart L., Rothacher M., Verduin A.* Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results // *Manuscripta Geodaetica*. – 1994. – V. 19. – P. 367–386.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.* Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // *Geophysical Research Letters*. – 1994. – V. 21. – P. 2191–2194. DOI: 10.1029/94GL02118
- Estey L., Wier S.* Teqc Tutorial. Basics of Teqc Use and Teqc Products [Электронный ресурс]. – URL: https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf. – Boulder, Colorado, USA: UNAVCO, 2014. – 61 p.
- Herring T.A., Floyd M.A., King R.W., McClusky S.C.* GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.6 [Электронный ресурс]. – URL: http://geoweb.mit.edu/gg/docs/GLOBK_Ref.pdf. – Cambridge MA: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2015. – 95 p.
- Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C.* Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report [Электронный ресурс]. – URL: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf. – Cambridge MA: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2018. – 54 p.
- IERS Conventions* // IERS Technical Note 36 / Petit G., Luzum B. (Eds.). [Электронный ресурс]. – URL: <https://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf>. – Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. – 179 p.
- Kadirov F.A., Guliyev I.S., Feyzullayev A.A., Safarov R.T., Mammadov S.K., Babayev G.R., Rashidov T.M.* GPS-based crustal deformations in Azerbaijan and their influence on seismicity and mud volcanism // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – V. 50, Is. 6. – P. 814–823. DOI: 10.1134/S1069351314060020. – EDN: UTO SNZ
- Kangarli T.N., Kadirov F.A., Yetirmishli G.J., Aliyev F.A., Kazimova S.E., Aliyev A.M., et al.* Recent geodynamics, active faults and earthquake focal mechanisms of the zone of pseudosubduction interaction between the Northern and Southern Caucasus microplates in the southern slope of the Greater Caucasus (Azerbaijan) // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2018. – Т. 9, № 4. – P. 1099–1126. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0385. – EDN: YPVQLJ
- Kazimov I.E.* Geodynamics of the territory of Azerbaijan on the basis of GPS data in 2017–2019 yy. // *Геология и Геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11, № 2. – С. 51–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.47.92.004. – EDN: WTROIW
- Kazimov I.E., Kazimova A.F.* Modern geodynamics of Azerbaijan on GPS station data for 2017–2018 years // *Seismoprognois observations in the territory of Azerbaijan*. – 2019. – V. 16, N 1. – P. 35–42.
- King R.W., Herring T.A., Floyd M.A., McClusky S.C.* GAMIT/GLOBK Overview [Электронный ресурс]. – URL: http://geoweb.mit.edu/~floyd/courses/gg/201807_Bishkek. – 2018.
- Lukk A.A., Shevchenko V.I.* Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2019. – V. 55, Is. 4. – P. 626–648. DOI: 10.1134/S1069351319040062. – EDN: NRLAHJ
- Milyukov V.K., Mironov A.P., Steblov G.M., Shevchenko V.I., Kusraev A.G., Drobyshev V.N., Khubaev Kh.M.* The contemporary GPS-derived horizontal motions of the main elements of tectonic structure in the Ossetian segment of Greater Caucasus // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2015. – V. 51, Is. 4. – P. 522–534. DOI: 10.1134/S1069351315040072. – EDN: UFADIN
- Prilepin M.T., Baranova S.M., Guseva T.V., Mishin A.V., Rogozhin E.A., Rozenberg N.K., Skovorodkin Yu.P., Balasanyan S., Nadariya M., Hamburger M., King R., Reilinger R.* The kinematic study of the Caucasus region using GPS techniques // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 1997. – V. 33, N 6. – P. 486–493. – EDN: LENCEF
- Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishin A.V., Prilepin M.T., Yunga S.L., Reilinger R.E., Hamburger M.W., Shempelev A.G.* Recent geodynamics of the Caucasus mountains from GPS and seismological evidence // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 1999. – V. 35, N 9. – P. 691–704. – EDN: LFQGFV
- Shevchenko V.I., Lukk A.A., Prilepin M.T., Reilinger R.E.* Present-day geodynamics of the Mediterranean-Lesser Caucasus part of the Alpine-Indonesian Mobile Belt // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – V. 50, Is. 1. – P. 38–56. DOI: 10.1134/S106935131306013X. – EDN: SKKUEH
- Ulmov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P.* Seismogeodynamics of lineament structures in the mountainous regions bordering the Scythian-Turan plate // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2006. – V. 42, N 7. – P. 551–566. DOI: 10.1134/S1069351306070032. – EDN: LJRSKJ
- Yetirmishli G.J., Kazimov I.E., Kazimova A.F.* Contemporary geodynamics of the Eastern Mediterranean // *Seismoprognois observations in the territory of Azerbaijan*. – 2021. – V. 20, N 2. – P. 3–10.

Сведения об авторах

Етирмишли Гурбан Джалал оглы, член-корреспондент НАНА, д-р геол.-мин. наук, профессор, генеральный директор Республиканского центра сейсмологической службы при Национальной академии наук Азербайджана (РЦСС при НАНА), г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: gyetirmishli@gmail.com

Казымов Ильяс Эльдар, д-р филос. геол.-мин. наук, доцент, нач. отдела РЦСС при НАНА, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: ilyas_24@mail.ru

Modern horizontal movements of tectonic blocks of the earth's crust of Azerbaijan according to the data of the global positioning system (GPS) of the RSSC network

© 2023 G.J. Yetirmishli, I.E. Kazimov

RSSC at ANAS, Baku, Azerbaijan

Received June 30, 2022

Abstract In order to identify the velocities of horizontal movements and directions of individual tectonic blocks of the earth's crust, the Republican Seismological Survey Center of Azerbaijan (RSSC), starting from 2012, decided to create a network of GPS stations. Taking into account geomorphology, geotectonics, topography and taking into account the influence of external factors, sites for the construction of new GPS stations were chosen in various regions of our country. This new monitoring system consists of 24 Trimble GPS stations (USA) with a processing and analysis center in Baku, where all data from all regions where the stations were installed are received online. For the first time in the world, a GPS station was installed on the Superdeep Saatly well (8324 m) in the territory of the Republic of Azerbaijan in the Saatly region. On the basis of GPS space geodesy data and seismological data, the current geodynamic conditions of the territory of Azerbaijan for 2020–2021 were analyzed. The most important feature of the velocity field of horizontal motions is the decrease in velocity values perpendicular to the direction of the Greater Caucasus strike from south to north. The velocity field clearly illustrates the movement of the earth's surface in the N-NE direction. In addition, within the Srednekura depression and in the Lesser Caucasus, there is a trend towards horizontal displacement, which is reflected in an increase in the speed of movement from west to east along the continuation of the ridge. It has been established that on the Absheron Peninsula the earth's crust is shortening at a rate of ~ 5 mm/year. It was found that in 2020 the maximum values of horizontal velocities were noted at the stations of Aghdam, Lerik, Lankaran, Jalilabad, Fizuli and Saatly, and the average value of velocities throughout the republic was 7.3 mm/year.

Keywords Azerbaijan, satellite geodesy, organization of observations, methods of data processing, modern movements of the earth's crust.

For citation Yetirmishli, G.J., & Kazimov, I.E. (2023). [Modern horizontal movements of tectonic blocks of the earth's crust of Azerbaijan according to the data of the global positioning system (GPS) of the RSSC network]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 7–18. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.01>. EDN: EPFCMZ

References

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modelling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 121, 6109–6131. DOI: [10.1002/2016JB013098](https://doi.org/10.1002/2016JB013098)
- Beutler, G., Brockmann, E., Gurtner, W., Hugentobler, U., Mervart, L., Rothacher, M., & Verdun, A. (1994). Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results. *Manuscripta Geodaetica*, 19, 367–386.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21, 2191–2194. DOI: [10.1029/94GL02118](https://doi.org/10.1029/94GL02118)
- Estey, L., & Wier, S. (2014). *Teqc Tutorial. Basics of Teqc Use and Teqc Products*. Boulder, Colorado, USA: UNAVCO Publ., 61 p. Available at: https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf
- Herring, T.A., Floyd, M.A., King, R.W., & McClusky, S.C. (2015). *GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.6*. Cambridge MA: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 95 p. Available at: http://geoweb.mit.edu/gg/docs/GLOBK_Ref.pdf
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M., & McClusky, S.C. (2018). *Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report*. Cambridge MA: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 54 p. Available at: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf

- Kadirov, F.A., Guliyev, I.S., Feyzullayev, A.A., Safarov, R.T., Mammadov, S.K., Babayev, G.R., & Rashidov, T.M. (2014). GPS-based crustal deformations in Azerbaijan and their influence on seismicity and mud volcanism. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(6), 814-823. DOI: 10.1134/S1069351314060020. EDN: UTOSNZ
- Kangarli, T.N., Kadirov, F.A., Yetirmishli, G.J., Aliyev, F.A., Kazimova, S.E., Aliyev, A.M., et al. (2018). Recent geodynamics, active faults and earthquake focal mechanisms of the zone of pseudosubduction interaction between the Northern and Southern Caucasus microplates in the southern slope of the Greater Caucasus (Azerbaijan). *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(4), 1099-1126. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0385. EDN: YPVQLJ
- Kazimov, I.E. (2021). Geodynamics of the territory of Azerbaijan on the basis of GPS data in 2017–2019 yy. *Geologiya i Geofizika Iuga Rossii* [Geology and Geophysics of Russian South], 11(2), 51-62. DOI: 10.46698/VNC.2021.47.92.004. EDN: WTROIW
- Kazimov, I.E., & Kazimova, A.F. (2019). Modern geodynamics of Azerbaijan on GPS station data for 2017–2018 years. *Seismoprognozis observations in the territory of Azerbaijan*, 16(1), 35-42.
- Khain, V.E., & Alizade, Ak.A. (Ch. Eds.). (2005). *Geologiya Azerbaidzhana. V 7 t. T. IV. Tektonika* [Geology of Azerbaijan: In 7 volumes. V. IV. Tectonics]. Baku, Azerbaijan: Nafta-Press Publ., 505 p. (In Russ.).
- King, R.W., Herring, T.A., Floyd, M.A., & McClusky, S.C. (2018). *GAMIT/GLOBK Overview*. Retrieved from http://geoweb.mit.edu/~floyd/courses/gg/201807_Bishkek
- Lukk, A.A., & Shevchenko, V.I. (2019). Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55(4), 626-648. DOI: 10.1134/S1069351319040062. EDN: NRLAHJ
- Milyukov, V.K., Mironov, A.P., Steblov, G.M., Shevchenko, V.I., Kusraev, A.G., Drobyshev, V.N., & Khubaev, Kh.M. (2015). The contemporary GPS-derived horizontal motions of the main elements of tectonic structure in the Ossetian segment of Greater Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 51(4), 522-534. DOI: 10.1134/S1069351315040072. EDN: UFADIN
- Petit, G., & Luzum, B. (Eds.). (2010). *IERS Conventions*. In *IERS Technical Note 36*. Frankfurt am Main, Germany: Publ. of the Federal Agency for Cartography and Geodesy, 179 p. Available at: <https://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf>
- Prilepin, M.T., Balasanyan, S., Baranova, S.M., Guseva, T.V., Mishin, A.V., Nadaria, M., Rogozhin, E.A., Rozenberg, N.K., Skovorodkin, Yu.P., Hamburger, M., King, R., & Reilinger, R. (1997). The kinematic study of the Caucasus region using GPS techniques. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 33(6), 486-493. EDN: LENCEF
- Shevchenko, V.I., Guseva, T.V., Lukk, A.A., Mishin, A.V., Prilepin, M.T., Reilinger, R.E., Hamburger, M.U., Shempelev, A.G., & Yunga, S.L. (1999). Recent geodynamics of the Caucasus mountains from GPS and seismological evidence. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 35(9), 691-704. EDN: LFQGFV
- Shevchenko, V.I., Lukk, A.A., & Guseva, T.V. (2017). *Avtonomnaya i pleittektonicheskaya geodinamika nekotorykh podvizhnykh poiasov i sooruzhenii* [Autonomous and plate-tectonic geodynamics of some mobile belts and mobile editices]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 612 p. (In Russ.). EDN: WCEWOD
- Shevchenko, V.I., Lukk, A.A., Prilepin, M.T., & Reilinger, R.E. (2014). Present-day geodynamics of the Mediterranean-Lesser Caucasus part of the Alpine-Indonesian Mobile Belt. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(1), 38-56. DOI: 10.1134/S106935131306013X. EDN: SKKUEH
- Ulomov, V.I., Danilova, T.I., Medvedeva, N.S., & Polyakova, T.P. (2006). Seismogeodynamics of lineament structures in the mountainous regions bordering the Scythian-Turan plate. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 42(7), 551-566. DOI: 10.1134/S1069351306070032. EDN: LJRSKJ
- Yetirmishli, G.J., Kazimov, I.E., & Kazimova, A.F. (2021). Contemporary geodynamics of the eastern Mediterranean. *Seismoprognozis observations in the territory of Azerbaijan*, 20(2), 3-10.

Information about authors

Yetirmishli Gurban Jalal, Corresponding Member of ANAS, Dr., Professor, Director of the Republican Seismic Survey Center of Azerbaijan National Academy of Sciences (RSSC of ANAS), Baku, Azerbaijan. E-mail: gyetirmishli@gmail.com

Kazimov Ilyas Eldar, PhD, Associate Professor, Head of Department of the RSSC of ANAS, Baku, Azerbaijan. E-mail: ilyas_24@mail.ru