

## Развитие деформационных процессов в Кавказском регионе по данным ГНСС-измерений

Т. В. Гусева, И. С. Крупенникова, А. Н. Мокрова

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия*  
*E-mails: guseva@ifz.ru, ik@ifz.ru, annmok@ifz.ru*

Рассмотрены результаты мониторинга современных движений, деформаций и сейсмической активности в Кавказском регионе, являющемся частью подвижного Альпийско-Гималайского пояса. Актуальность проведенных исследований обусловлена необходимостью систематизировать и обобщить накопленные данные геодезических спутниковых наблюдений GPS/ГЛОНАСС на пунктах Северо-Кавказской геодинамической сети за 2005–2014 гг. Произведена оценка характера современных движений земной коры и их развития во времени, отражающихся в площадном деформировании геологической структуры региона в направлении главных осей сжатия и растяжения со средней скоростью  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ , а также в распределении интенсивности сдвиговых деформаций. В период первого и части второго десятилетия текущего века наибольшая геодинамическая активность была присуща восточной части региона, где обнаружены аномальные участки площадного деформирования до  $-3,1 \cdot 10^{-7}$  (сжатие) и  $2,3 \cdot 10^{-7}$  (растяжение), совпадающие с зоной повышенного выделения сейсмической энергии, достигающей  $10^{10}$  Дж/км<sup>2</sup>. Обсуждаемые результаты дают количественные оценки средних и аномальных скоростей горизонтальных движений, площадных и сдвиговых деформаций в сопоставлении с величиной выделившейся за десятилетие сейсмической энергии. Такой подход значительно расширяет геофизико-геодинамическую информацию о Кавказском регионе и отражает количественное влияние на его современное тектоническое развитие более подвижной Аравийской тектонической плиты.

**Ключевые слова:** Северный Кавказ, мониторинг, современные движения, GPS, ГЛОНАСС, деформации, геодинамика, сейсмичность

Одобрена к печати: 10.07.2019  
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-138-146

### Введение

Кавказский регион является частью подвижного Альпийско-Гималайского пояса. Это сложный геологический объект, активное развитие которого продолжается и в настоящее время. Ему свойственны образование складчато-надвиговой структуры с активными движениями земной коры, сложные системы разломов, вулканизм, повышенная сейсмичность (Новейшая..., 2000).

Первые GPS-наблюдения (Global Positioning System, система глобального позиционирования) на территории Северного Кавказа были проведены сотрудниками Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) при участии американских специалистов после Рачинского землетрясения (Грузия, 29 апреля 1991 г.  $M_s = 7-7,2$ ) — сильнейшего из инструментально зарегистрированных сейсмических событий на Западном Кавказе (Прилепин и др., 1997; Reilinger et al., 1991, 1997). В последующие годы российская Северо-Кавказская сеть GPS была расширена и модифицирована, стала частью Среднеземноморской геодинамической сети по международному изучению деформаций Альпийско-Гималайского подвижного пояса и процесса влияния взаимодействия Евразийской и Аравийской тектонических плит (Шевченко и др., 1999). Данные мониторинговых спутниковых измерений, выполненных сотрудниками ИФЗ РАН на Северном Кавказе до 2005 г., использованы при совместной обработке наблюдений GPS в Средиземноморском регионе, построении карт векторов скоростей горизонтальных движений относительно Евразийской

плиты, создании блочной модели зоны взаимодействия Аравийской, Африканской, Нубийской, Сомалийской и Евразийской плит (Reilinger et al., 2006).

В предлагаемом исследовании использованы данные обработки измерений GPS/ГЛОНАСС на пунктах расширенной Северо-Кавказской геодинимической сети от Крыма до Дагестана, полученные сотрудниками ИФЗ РАН или при их участии за период 2005–2014 гг. (Галаганов и др., 2013; Милуков и др., 2015; Розенберг и др., 2013).

Актуальность представленных исследований вызвана необходимостью систематизировать и обобщить накопленные данные геодезических спутниковых наблюдений GPS/ГЛОНАСС на пунктах Северо-Кавказской геодинимической сети за первое десятилетие текущего века.

Целью работы является анализ характера развития распределения скоростей площадных и сдвиговых деформаций земной коры по данным мониторинговых спутниковых измерений и сопоставления их с сейсмической активностью в едином временном интервале для северного склона Большого Кавказа и Предкавказья.

### Методики спутниковых измерений и обработки результатов

В состав рассматриваемой Северо-Кавказской геодинимической сети включены три пункта с постоянной регистрацией спутниковых сигналов и 27 пунктов дискретных наблюдений GPS/ГЛОНАСС, на которых выполнено не менее трёх повторных эпох наблюдений за рассматриваемый временной интервал (рис. 1). Для связи с международной геодинимической системой координат использованы также данные с 23 ближайших станций IGS (International GNSS Service, международная геодинимическая сеть для предоставления данных высокого качества стандарта GNSS — Global Navigation Satellite Systems, ГНСС — спутниковая система навигации).

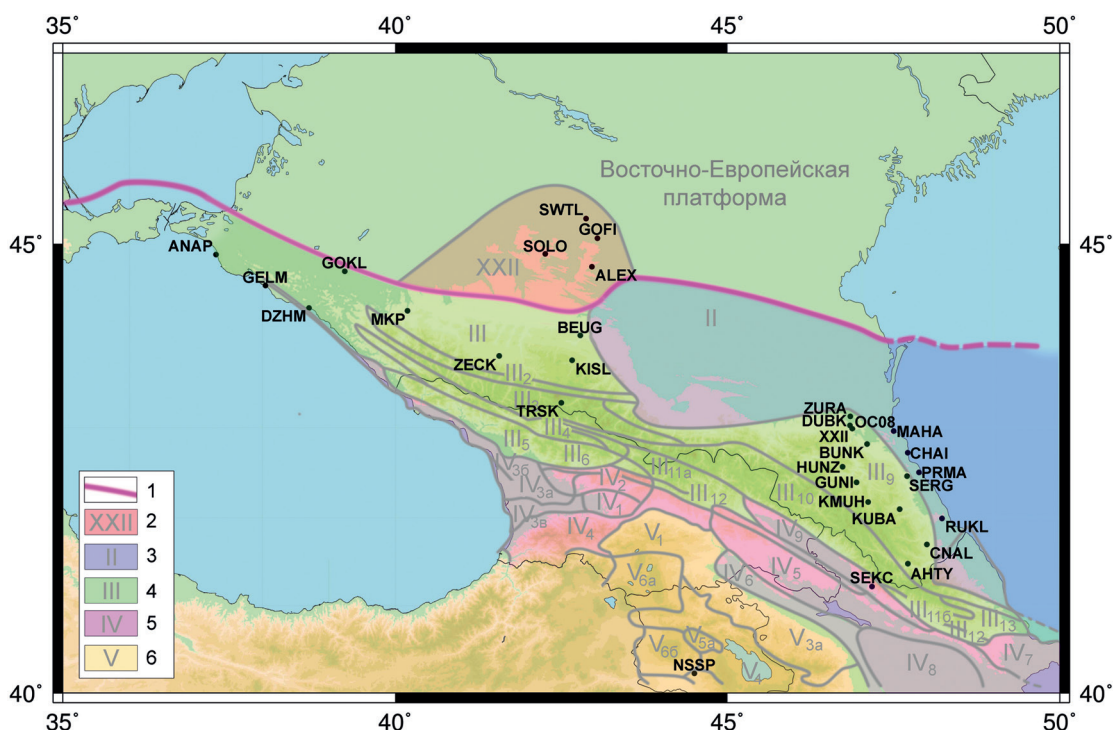


Рис. 1. Местоположение пунктов GPS/ГЛОНАСС Северо-Кавказской геодинимической сети относительно структурных элементов Кавказа и Восточно-Европейской платформы (ВЕП): 1 — граница ВЕП, 2 — Ставропольский выступ. Основные структурные зоны Кавказа (Рогожин и др., 2011): 3 — Терско-Каспийский прогиб; 4 — мегантиклинорий Большого Кавказа; 5 — Закавказский межгорный пояс; 6 — мегантиклинорий Малого Кавказа

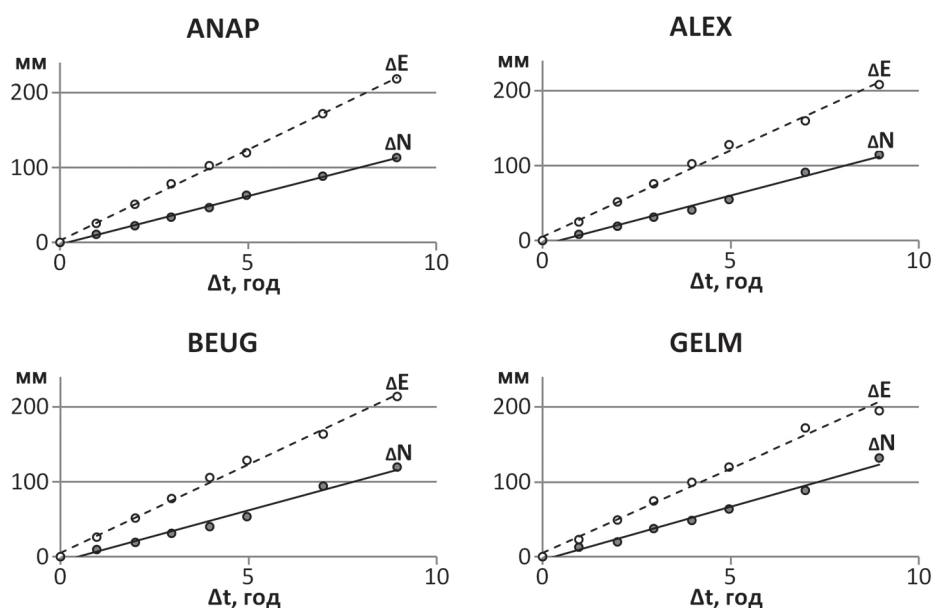


Рис. 2. Графики временного хода ( $\Delta t$ ) перемещений пунктов ИФЗ РАН за 2005–2014 гг. в ITRF 2008

Измерения GPS+ГЛОНАСС на пунктах геодинамической сети проводились в летние месяцы способом дифференциального позиционирования в статическом режиме с использованием двухчастотных приёмников Javad сериями продолжительностью по 4–20 сут с интервалом регистрации 30 с. Обработка «сырых» данных выполнялась с помощью программного комплекса Bernese 5.0. В результате были определены среднесуточные геоцентрические и геодезические координаты пунктов с оценкой их точности, выполнено их осреднение за временной интервал регистрации в отсчётной координатной системе ITRF 2008 (International Terrestrial Reference Frame, Международная земная система отсчёта), причём в качестве опорных были выбраны четыре станции IGS (ZECK в Зеленчукской, BUCU в Бухаресте, POLV в Полтаве, MDVJ в Менделеево), остальные станции рассматривались как определяемые. Временной ход средних значений компонент (широтной  $\Delta N$  и долготной  $\Delta E$ ) координат на эпоху измерений относительно начальной эпохи в ITRF 2008 для некоторых пунктов, приведённый на графиках (рис. 2), показывает присущие им практически равномерные направленные изменения с коэффициентом корреляции близким к единице, что указывает на функциональную зависимость полученных значений  $\Delta N$  и  $\Delta E$  от продолжительности временного интервала  $\Delta t$  между эпохами измерений.

### Результаты. Движения и деформации

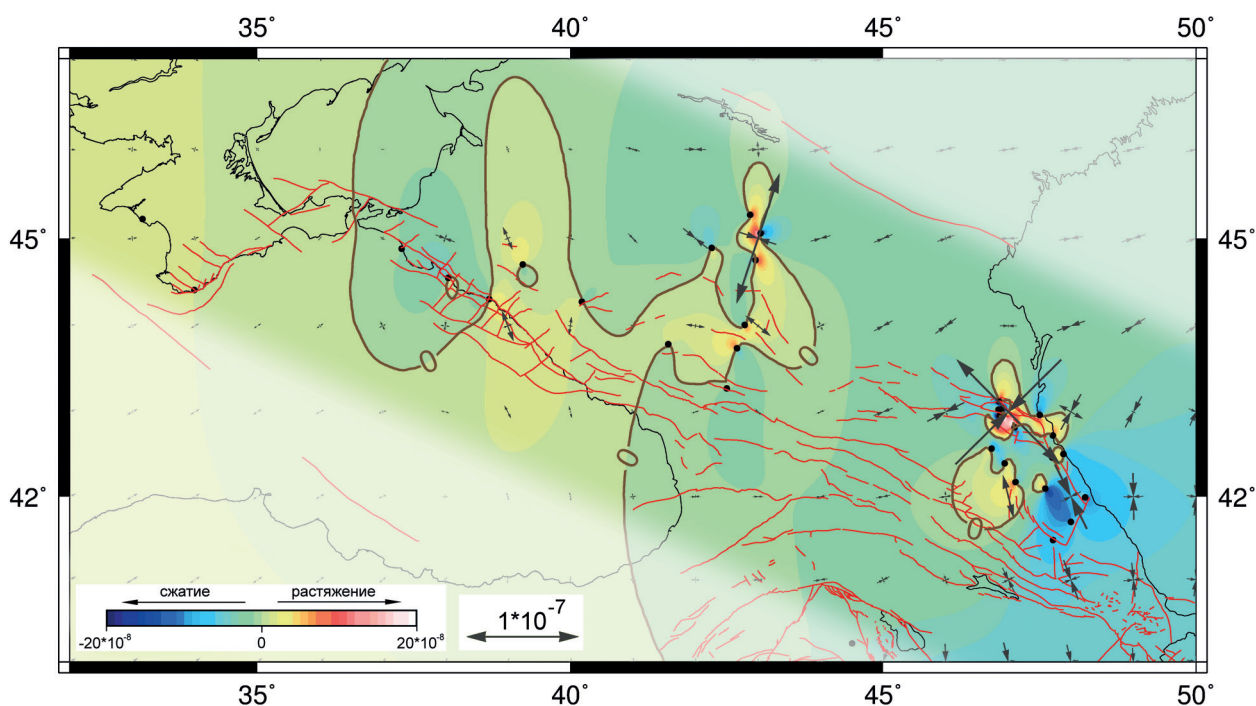
С использованием аппроксимированных значений полученного временного хода средних величин широтной и долготной компонент координат пунктов определены скорости для всего рассматриваемого периода наблюдений. Оценка точности выполнена по результатам отклонения средних величин координат на эпоху измерений от их аппроксимированного значения.

Векторы скорости горизонтального смещения пунктов в координатной системе ITRF имеют северо-восточное направление, а их модули изменяются от 25 мм/год на северо-западе до 34 мм/год на юго-востоке региона при максимальных значениях ошибок, не превышающих  $\pm 2$  мм/год, средних —  $\pm 1$  мм/год. Минимальные, максимальные и средние аппроксимированные значения скоростных компонент вектора скорости и его модуля, а также их стандартные отклонения за период 2005–2014 гг. в ITRF 2008 для пунктов западного Кавказа с Предкавказьем, восточного Кавказа (Дагестан) и ближайших пунктов IGS приведены в таблице.

Аппроксимированные значения компонент координат ( $V_n$  — широтная,  $V_e$  — долготная,  $V_s$  — модуль вектора скорости,  $Az$  — азимут перемещения) и их ошибок ( $\sigma_n, \sigma_e, \sigma_s$ )

Пункты	Значения	$V_n$ , мм/год	$\sigma_n$ , мм/год	$V_e$ , мм/год	$\sigma_e$ , мм/год	$V_s$ , мм/год	$\sigma_s$ , мм/год	Az, град
Дагестан	мин.	9,9	0	26,5	0,1	28,8	0,5	63
	средн.	12,1	0,8	28,6	0,6	31,1	1,1	67
	макс.	14,8	2	32	1,5	34,5	2	73
Западный Кавказ	мин.	10	0,2	21,9	0,3	25,6	0,3	58
	средн.	12,7	0,6	23,8	0,6	27	0,9	62
	макс.	14,2	1,8	26,7	1,2	29,5	2,1	67
IGS	мин.	6,3	0,1	1,4	0,1	11,5	0,1	7
	средн.	12,9	0,2	22,6	0,2	26,3	0,3	59
	макс.	20	0,7	31,6	0,4	36,9	0,8	76

Расчёт деформаций выполнен с помощью программного пакета GMT (Generic Mapping Tools). Первый тензор деформаций, отражающий направление главных осей сжатия/растяжения, а также их распределение по площади, приведён на *рис. 3*. Значения деформаций в среднем составляют  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ . Западная часть исследуемого района развивалась в области слабого сжатия, центральной части было присуще чередование участков площадного сжатия и растяжения, а на востоке преобладало сжатие. Также в течение рассматриваемого временного диапазона на территории Ставропольского свода и Дагестана существовали зоны аномальных деформаций, достигающих значений  $(-3...+2) \cdot 10^{-7}$  (см. *рис. 3*).



*Рис. 3.* Распределение площадных деформаций и главных осей сжатия/растяжения (стрелки). Красными линиями обозначены основные тектонические нарушения

На востоке региона максимальные деформации приурочены к сложной системе разломов, обрамляющих Дагестанский клин.

Расчёт второго тензора деформаций позволяет оценить интенсивность сдвиговых деформаций, составляющих на рассматриваемой территории в среднем  $(2-3) \cdot 10^{-8}$  и достигающих  $3 \cdot 10^{-7}$  на аномальных участках Дагестанского клина и Ставропольского свода (рис. 4).

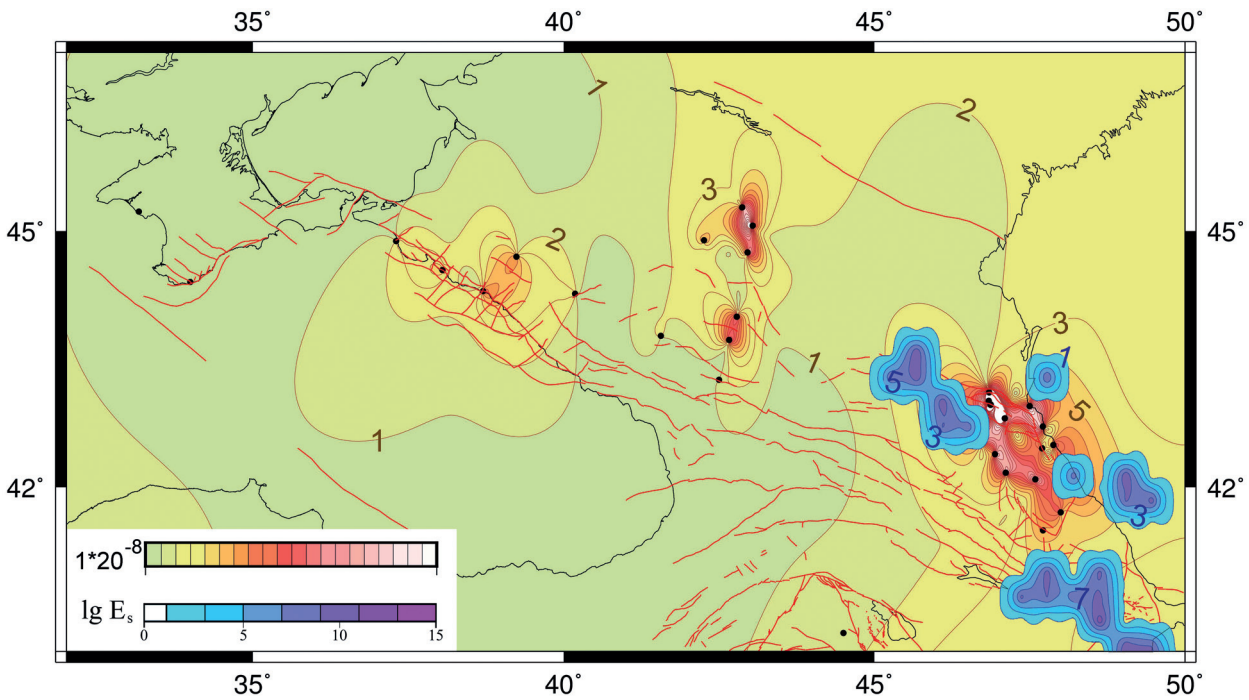


Рис. 4. Распределение интенсивности сдвиговых деформаций и суммарной выделившейся сейсмической энергии от подкорковых землетрясений. Красными линиями обозначены основные тектонические нарушения, в левом нижнем углу приведены масштабные шкалы для сдвиговых деформаций (верхняя) и распределения суммарной выделившейся сейсмической энергии (нижняя)

### Сейсмичность

На исследуемой территории с 2004 по 2014 г. по данным Геологической службы США (United States Geological Survey — USGS) было зафиксировано 436 сейсмических событий с магнитудами  $1,0 \leq M_s \leq 5,7$ , из них семь — с  $M_s > 5$ . Землетрясение с магнитудой  $M_s = 5,72$  произошло 07.09.2009 в Грузии ( $43,44^\circ$  з.д. и  $42,66^\circ$  с.ш., глубина 15 км). Для сопоставления деформирования территории с сейсмической активностью предложено использовать параметр количества выделившейся энергии землетрясений с использованием соотношения Гутенберга – Рихтера:  $\lg E = 1,5M_s + 4,8$ .

Исследуемый регион был разбит прямоугольной сеткой на ячейки площадью  $1000 \text{ км}^2$ , для каждой из которых проведено суммирование сейсмической энергии всех землетрясений, возникших за рассматриваемый период, и построена карта распределения сейсмической энергии ( $\text{Дж/км}^2$ ) (рис. 5, см. с. 143).

За рассматриваемый период величина выделившейся сейсмической энергии в среднем была равна  $10^6 - 10^9 \text{ Дж/км}^2$ . Максимальное значение суммарной энергии ячейки составило  $10^{10} \text{ Дж/км}^2$ . Наиболее активными являлись центральная и восточная области Большого Кавказского хребта и территория Дагестана: именно здесь зафиксированы самые глубокие (подкорковые, на глубинах от 55 до 200 км) очаги землетрясений. Область распределения наибольших сейсмических энергий оконтуривает зону интенсивных сдвиговых деформаций восточного Кавказа, что свидетельствует о достаточно активной тектонике данного района (см. рис. 4, 5).

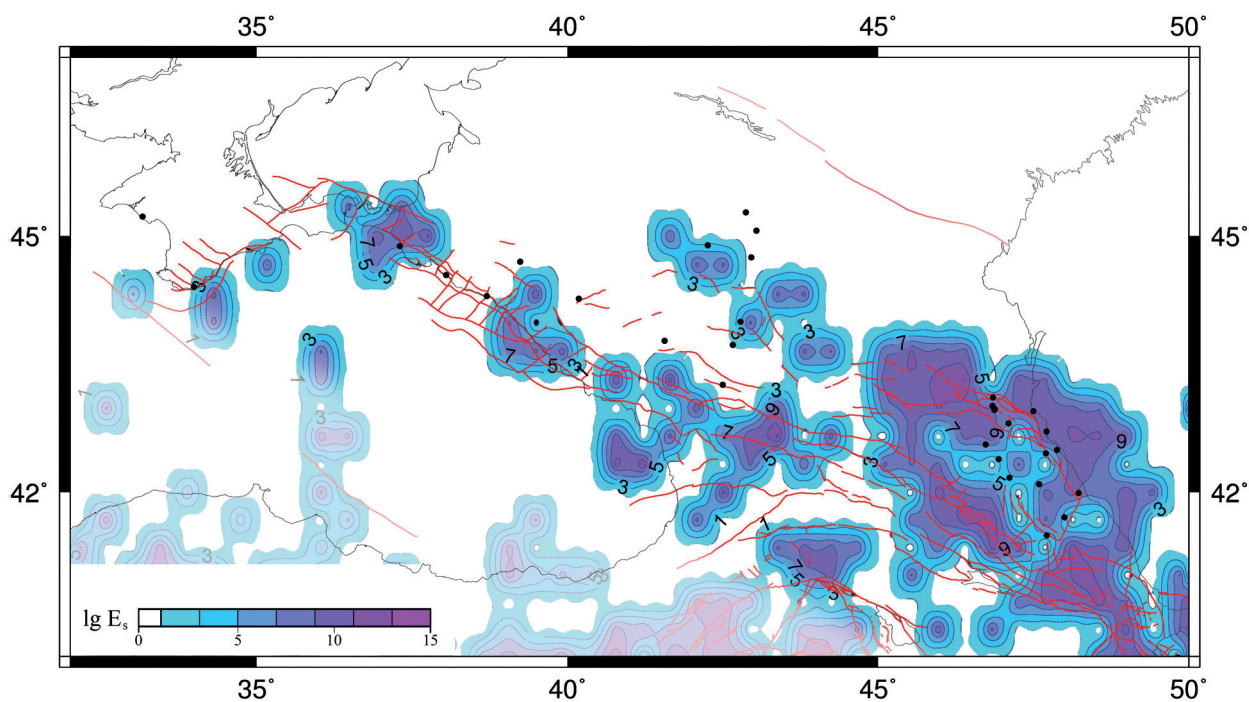


Рис. 5. Распределение суммарной выделившейся сейсмической энергии, нормированной на единицу площади ( $1000 \text{ км}^2$ )

### Обсуждение результатов

Значительное увеличение количества специально закреплённых пунктов Северо-Кавказской геодезической сети позволило расширить территорию, обеспеченную повторными прецизионными координатными определениями с помощью спутникового геодезического мониторинга в течение временного интервала 2005–2014 гг. Следует отметить, что в сформированный блок результатов наблюдений включены данные только с тех пунктов, на которых регистрация спутниковых сигналов в каждом цикле проводилась непрерывно в течение нескольких суток. Использование программного комплекса Bernese 5.0 позволило рассчитать среднесуточные и средние по циклу значения координат в ITRF 2008. Показано, что изменение средних значений плановых координат происходит направленно и достаточно равномерно во времени, т. е. с неизменной скоростью, определённой по результатам линейной аппроксимации с коэффициентом корреляции близким к единице. Несмотря на равномерность развития горизонтальных смещений, каждому из пунктов наблюдений свойственна индивидуальная скорость и ориентировка, которая в координатной системе ITRF 2008 изменяется от 25 мм/год на северо-западе до 34 мм/год на юго-востоке региона при максимальных ошибках, не превышающих  $\pm 2$  мм/год, средних —  $\pm 1$  мм/год. При общей направленности горизонтальных движений на северо-восток каждый из пунктов имеет также индивидуальность по ориентировке со средним азимутом  $62^\circ$  на северо-западе и  $67^\circ$  на юго-востоке региона.

Использование кинематических горизонтальных движений позволило определить характеристики деформационных процессов, отражающихся в направлении и величине главных осей сжатия и растяжения, а также интенсивности сдвиговых деформаций, представленных в картах их площадного распределения вдоль геологической структуры региона. В рассматриваемые десятилетия текущего века средние значения площадных деформаций имели достаточно небольшие значения  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$  в год, наибольшая геодезическая активность была присуща восточной части региона, расположенной в Дагестане, где обнаружены аномальные участки площадного деформирования со скоростью до  $-3,1 \cdot 10^{-7}$  (сжатие) и  $2,3 \cdot 10^{-7}$  (растяжение) в год, совпадающие с зоной повышенного выделения сейсмической энергии, достигающей  $10^{10}$  Дж/км<sup>2</sup>.

Отметим, что направления главных осей сжатия и растяжения не противоречат данным, полученным другими исследователями (Милюков и др., 2015; Шевченко и др., 1999).

Основная часть землетрясений, зафиксированных за рассмотренный временной интервал, происходила в земной коре с глубинами очагов менее 55 км и являлась отражением активности разломно-блоковой структуры литосферы данного региона. Для всего Кавказа характерны разломы продольного простирания. Наиболее сейсмоактивным является Восточный Кавказ, который расположен в зоне сочленения крупных блоков земной коры с тремя системами разломов различного простирания: продольного (общекавказского), поперечного (северо-восточного) и диагонального (северо-западного). Именно в этом регионе зарегистрировано 27 самых глубокофокусных землетрясений (60–165 км), гипоцентры которых зафиксированы по границе области максимальных площадных и сдвиговых деформаций Восточного Кавказа. Данная особенность представляется весьма интересной и требующей дальнейших исследований.

Таким образом, обсуждаемые результаты представляют количественные оценки средних и аномальных скоростей горизонтальных движений, площадных и сдвиговых деформаций в сопоставлении с величиной выделившейся за десятилетие сейсмической энергии. Такой подход значительно расширяет геофизико-геодинамическую информацию и отражает количественное влияние на современное развитие Кавказского региона более подвижной Аравийской тектонической плиты, а также локальных факторов внутри региона.

## Литература

1. Галаганов О. Н., Гусева Т. В., Розенберг Н. К., Передерин В. П. Изучение движений земной коры геодезическими методами // Актуальность идей Г. А. Гамбурцева в геофизике XXI века. М.: Янус-К, 2013. С. 329–338.
2. Милюков В. К., Миронов А. П., Стеблов Г. М., Шевченко В. И., Кусраев А. Г., Дробышев В. Н., Хубаев Х. М. Современные горизонтальные движения основных элементов тектонической структуры осетинской части Большого Кавказа по GPS-измерениям // Физика Земли. 2015. № 4. С. 68–80.
3. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / под ред. Грачева А. Ф. М.: ПРОБЕЛ, 2000. 487 с.
4. Прилепин М. Т., Баласанян С., Баранова С. М., Гусева Т. В., Мишин А. В., Надария М., Рогожин Е. А., Розенберг Н. К., Сквородкин Ю. П., Хамбургер М., Кинг Р., Рейлингер Р. Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GPS технологии // Физика Земли. 1997. № 6. С. 68–75.
5. Рогожин Е. А., Иогансон Л. И., Завьялов А. Д., Захаров В. С., Лутиков А. И., Славина Л. Б., Рейнер Г. И., Овсяченко А. Н., Юнга С. Л., Новиков С. С. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмические предвестники землетрясений — основа реального сейсмического прогноза. М.: Светоч Плюс, 2011. 368 с.
6. Розенберг Н. К., Галаганов О. Н., Гусева Т. В., Передерин В. П. Деформационный мониторинг разномасштабных структур на Северном Кавказе // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы 3-й Молодежной школы-семинара. М.: ИФЗ, 2013. Т. 1. С. 290–297.
7. Шевченко В. И., Гусева Т. В., Лукк А. А., Мишин А. В., Прилепин М. Т., Рейлинджер Р. Э., Хамбургер М. У., Шемпелев А. Г., Юнга С. Л. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS-измерений и сейсмологическим данным) // Физика Земли. 1999. № 9. С. 3–18.
8. Reilinger R. E., Hamburger M. W., Prilepin M. T., Guseva T. V. Epoch Geodynamic GPS Measurement Across the Caucasus Collision Zone // AGU 1991 Fall Meeting: Program and Abstracts. San-Francisco, California. 1991. P. 112.
9. Reilinger R., McClusky S., Souter B., Hamburger M., Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements // J. Geophysical Research. 1997. V. 24. No. 14. P. 1815–1818.
10. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrova A., Filikov S. V., Gontz F., Al-Ghazzi R., Karam G. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. B5. P. B05411.

## Development of deformation processes in the Caucasus region derived from GNSS measurements

T. V. Guseva, I. S. Krupennikova, A. N. Mokrova

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia*

*E-mails: guseva@ifz.ru, ik@ifz.ru, annmok@ifz.ru*

The results of monitoring modern movements, deformations and seismic activity in the Caucasus region, which is part of the mobile Alpine-Himalayan belt, are considered. The relevance of the research is due to the need to systematize and summarize the accumulated data of geodetic satellite observations of GPS/GLONASS at the points of the North Caucasus geodynamic network for 2005–2014. The assessment is given of the nature of modern movements of earth crust and their evolution in time, reflected in the scale of deformation of the geological structure of the region in the direction of the main axes of compression and extension with an average speed of  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ , as well as in the distribution of the intensity of the shear deformations. During the first and part of the second decade of the current century, the greatest geodynamic activity was inherent in the Eastern part of the region, where anomalous areas of areal deformation up to  $-3.1 \cdot 10^{-7}$  (compression) and  $2.3 \cdot 10^{-7}$  (tension) were found, coinciding with the zone of increased seismic energy release, reaching  $10^{10}$  J/km<sup>2</sup>. The results under discussion provide quantitative estimates of the mean and abnormal velocities of horizontal movements, area and shear deformations in comparison to the magnitude of the seismic energy released over the decade. This approach significantly broadens the geophysical and geodynamic information about the Caucasus region and reflects the quantitative impact on its modern tectonic development of the more mobile Arabian tectonic plate.

**Keywords:** North Caucasus, monitoring, modern movements, GPS, GLONASS, deformation, geodynamics, seismicity

Accepted: 10.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-138-146

### References

1. Galaganov O. N., Guseva T. V., Rozenberg N. K., Perederin V. P., *Izuchenie dvizhenii zemnoi kory geodezicheskimi metodami (The study of the movements of the earth's crust geodetic methods)*, *Aktual'nost' idei G. A. Gamburtseva v geofizike XXI veka (The Relevance of the Ideas of G. A. Gamburtsev in Geophysics of the XXI Century)*, Moscow: Yanus-K, 2013, pp. 329–338.
2. Milyukov V. K., Mironov A. P., Steblov G. M., Shevchenko V. I., Kusraev A. G., Drobyshev V. N., Khubaev Kh. M., *Sovremennye gorizontallye dvizheniya osnovnykh elementov tektonicheskoi struktury osetinskoj chasti Bol'shogo Kavkaza po GPS-izmereniyam (Modern horizontal movements of the main elements of the tectonic structure of the Ossetian part of the Greater Caucasus from GPS measurements)*, *Fizika Zemli*, 2015, No. 4, pp. 68–80.
3. *Noveishaya tektonika, geodinamika i seismichnost' Severnoi Evrazii (Neotectonics, geodynamics and seismicity of Northern Eurasia)*, Grachev A. F. (ed.), Moscow: Probel, 2000, 467 p.
4. Prilepin M. T., Balasanyan S., Baranova S. M., Guseva T. V., Mishin A. V., Nadariya M., Rogozhin E. A., Rozenberg N. K., Skovorodkin Yu. P., Khamburger M., King R., Reilinger R., *Izuchenie kinematiki Kavkazskogo regiona s ispol'zovaniem GPS tekhnologii (Studying the kinematics of the Caucasus region using GPS technology)*, *Fizika Zemli*, 1997, No. 6, pp. 68–75.
5. Rogozhin E. A., Ioganson L. I., Zav'yalov A. D., Zakharov V. S., Lutikov A. I., Slavina L. B., Reisner G. I., Ovsyuchenko A. N., Yunga S. L., Novikov S. S., *Potentsial'nye seismicheskie ochagi i seismicheskie predvestniki zemletryasenii — osnova real'nogo seismicheskogo prognoza (Potential seismic foci and seismic precursors of earthquakes — the basis of a real seismic forecast)*, Moscow: Svetoch Plyus, 2011, 368 p.
6. Rozenberg N. K., Galaganov O. N., Guseva T. V., Perederin V. P., *Deformatsionnyi monitoring raznomasshtabnykh struktur na Severnom Kavkaze (Deformation monitoring of multi-scale structures in the North Caucasus)*, *Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezul'taty (Modern tectonophysics. Methods and results)*, Proc. 3<sup>rd</sup> Youth School-Seminar, Moscow: IFZ RAN, 2013, Vol. 1, pp. 290–297.
7. Shevchenko V. I., Guseva T. V., Lukk A. A., Mishin A. V., Prilepin M. T., Reilindzher R. E., Hamburger M. U., Shempelev A. G., Yunga S. L., *Sovremennaya geodinamika Kavkaza (po rezul'tatam GPS izmerenii*



- i seismologicheskim dannym) (Modern geodynamics of the Caucasus (based on the results of GPS measurements and seismological data)), *Fizika Zemli*, 1999, No. 9, pp. 3–18.
8. Reilinger R. E., Hamburger M. W., Prilepin M. T., Guseva T. V., Epoch Geodynamic GPS Measurement Across the Caucasus Collision Zone, In: *AGU 1991 Fall Meeting: Program and Abstracts*, San-Francisco, California, 1991, p. 112.
  9. Reilinger R., McClusky S., Souter B., Hamburger M., Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S., Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 24, No. 14, pp. 1815–1818.
  10. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S. V., Gontz F., Al-Ghazzi R., Karam G., GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, B5, p. B05411.