ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.242.1
DOI: 10.46698/VNC.2026.82.51.001

Оригинальная статья

Пространственно-временной анализ современных движений земной коры Западного Кавказа на основе ГНСС-измерений и оценка конфигурации региональной геодинамической сети

П.А. Докукин, А.И. Маневич, Р.В. Шевчук, А.Н. Байрамов

Российский университет дружбы народов, Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Статья поступила: 21.04.2026, доработана: 18.09.2026, принята к публикации: 21.09.2026

Резюме: Актуальность работы. Западный Кавказ характеризуется пространственно неоднородными современными движениями земной коры и активной разломно-блоковой структурой. Опубликованные оценки скоростей ГНСС-пунктов получены на разных временных интервалах и представлены как в табличной, так и в картографической форме, что затрудняет их совместный деформационный анализ. Особое практическое значение задача имеет для Туапсе–Сочинского сегмента, где геодинамически активные структуры пересекают плотно освоенную прибрежно-горную территорию. **Цель работы** – обобщить опубликованные данные о горизонтальных движениях Западного Кавказа, оценить параметры современного деформационного поля и проверить пригодность конфигурации объединённой сети для конечно-элементного анализа. **Методы.** Сформирован массив из 54 ГНСС-пунктов по трём опубликованным наборам. Отсутствующие численные значения восстановлены по геопривязанным в QGIS картографическим схемам посредством оцифровки начала и конца векторов с учётом масштаба источника. По компонентам скорости рассчитаны главные деформации, дилатация и полный сдвиг. Сеть построена методом триангуляции Делоне; геометрия конечных элементов оценена отношением радиусов описанной и вписанной окружностей R/r. **Результаты.** Региональный фон соответствует согласованному движению на северо-северо-восток, однако внутри региона выделяются локальные зоны сжатия, растяжения и сдвиговой локализации. В Туапсе–Сочинском сегменте деформационное поле асимметрично и мозаично; контрасты тяготеют к разломным границам и узлам их пересечения. Большинство треугольников имеет оптимальную или приемлемую форму, а неблагоприятные элементы сосредоточены преимущественно на периферии сети. Впервые для объединённой выборки одновременно сопоставлены инварианты деформации и количественный критерий качества геометрии каждого треугольного элемента. **Выводы.** Объединение разнородных опубликованных скоростей позволяет выявить устойчивые региональные закономерности, но амплитуды локальных аномалий следует интерпретировать с учётом различий систем отсчёта, продолжительности наблюдений и погрешности графической оцифровки. Предложенная классификация R/r задаёт явные условия отбора элементов и обосновывает развитие сети непрерывных наблюдений в районе Большого Сочи.

Ключевые слова: современные движения земной коры, ГНСС, деформационный анализ, дилатация, полный сдвиг, триангуляция Делоне, Западный Кавказ, геодинамический мониторинг.

Благодарности: *Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FSSF-2026-0077).*

Для цитирования: Докукин П.А., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Байрамов А.Н. Пространственно-временной анализ современных движений земной коры Западного Кавказа на основе ГНСС-измерений и оценка конфигурации региональной геодинамической сети. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): 47–57. DOI: 10.46698/VNC.2026.82.51.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.82.51.001

Original paper

Present-day crustal movements in the Western Caucasus region from GNSS data and analysis of the regional geodynamic network configuration

P.A. Dokukin, A.I. Manevich, R.V. Shevchuk, A.N. Bayramov

RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation,
e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Received: 21.04.2026, revised: 18.09.2026, accepted: 21.09.2026

Abstract: Relevance. The Western Caucasus is characterized by spatially heterogeneous present-day crustal motions and an active fault-block structure. Published GNSS site velocities cover different time intervals and are reported in both tabular and map form, which complicates their joint deformation analysis. The problem is especially important for the Tuapse–Sochi segment, where active structures cross a densely developed coastal and mountain area. **Aim.** This study compiles published horizontal velocity estimates for the Western Caucasus, evaluates the present-day strain field, and tests whether the geometry of the combined network is suitable for finite-element analysis. **Methods.** A data set of 54 GNSS sites was assembled from three published sources. Where numerical values were unavailable, maps were georeferenced in QGIS and the start and end of each velocity vector were digitized; vector magnitude, azimuth, and east and north components were then derived using the source scale. Principal strain rates, dilatation, and total shear strain rate were calculated. The network was triangulated using the Delaunay algorithm, and element geometry was assessed by the circumradius-to-inradius ratio R/r. **Results.** The regional field confirms coherent north-northeastward motion, while local domains of contraction, extension, and shear localization occur within the study area. The Tuapse–Sochi strain field is asymmetric and mosaic-like, with major contrasts spatially associated with fault boundaries and fault-intersection zones. Most triangles have optimal or acceptable geometry, whereas unfavorable elements occur mainly along the network margins. **Conclusions.** Combining heterogeneous published velocities reveals robust regional patterns, but the amplitudes of local anomalies must be interpreted with regard to reference-frame differences, observation-span variability, and graphical digitization uncertainty. The proposed R/r classes provide explicit element-selection rules and support further development of continuous GNSS monitoring in the Greater Sochi area.

Keywords: present-day crustal movements, GNSS, strain analysis, dilatation, total shear strain, Delaunay triangulation, Western Caucasus, geodynamic monitoring.

Acknowledgements: *This work was funded by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSF-2026-0077).*

For citation: Dokukin P.A., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Bayramov A.N. Present-day crustal movements in the Western Caucasus region from GNSS data and analysis of the regional geodynamic network configuration. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): 47–57. DOI: 10.46698/VNC.2026.82.51.001

Введение

Современные движения земной коры Западного Кавказа важны для изучения активной тектоники и для мониторинга плотно освоенной прибрежно-горной территории, включая участки размещения ответственных сооружений [Бабешко и др., 2012; Рогожин и др., 2014]. Современные ГНСС-исследования подтверждают распределённый характер деформаций Кавказского сегмента Альпийско-Гималайского пояса и их связь с блоковыми движениями и активными разломами [Milyukov et al., 2022; Steblov et al., 2023; Kaftan et al., 2024; Castro-Perdomo et al., 2025; Kazimov et al., 2026]. Наблюдаемая

космической геодезией дальнепольная реакция коры на крупные события в Восточной Анатолии дополнительно показывает региональную значимость согласованного анализа геодезических данных [Ergintav et al., 2024].

Для Западного Кавказа установлено согласованное северо-северо-восточное движение в глобальной системе отсчёта и выделены внутрипоясные зоны сжатия, растяжения и сдвига [Milyukov et al., 2022; Steblov et al., 2023; Гурбанов и др., 2023]. В Туапсе–Сочинском сегменте локальные наблюдения указывают на активность Мзымтинского разлома и поперечных нарушений, однако опубликованные скорости относятся к разным периодам, системам отсчёта и форматам представления [Бабешко и др., 2019; Шестопалов и др., 2021]. Единого массива, пригодного одновременно для деформационного анализа и проверки геометрии сети, ранее не формировалось.

Цель работы – обобщить опубликованные сведения о горизонтальных движениях земной коры Западного Кавказа, рассчитать по унифицированному набору скоростей параметры деформационного поля и оценить конфигурацию объединённой региональной сети. Для этого сопоставлены табличные и оцифрованные данные, рассчитаны инвариантные характеристики тензора деформации и выполнена триангуляция Делоне с количественной оценкой формы конечных элементов.

Геологические и геодинамические условия района

Район исследования охватывает западную часть горного сооружения Большого Кавказа, прилегающие структуры Западного Предкавказья и северо-восточного побережья Чёрного моря. В направлении от моря к северо-востоку прослеживаются Туапсинский прогиб, зоны Южного и Северного склонов, Осевая зона, Западно-Кубанский передовой прогиб и Скифская плита. Их строение и молодые деформации определяют пространственную неоднородность современного рельефа и поля движений [Рогожин и др., 2014; Макеев и др., 2024; Kaftan et al., 2024] (рис. 1).

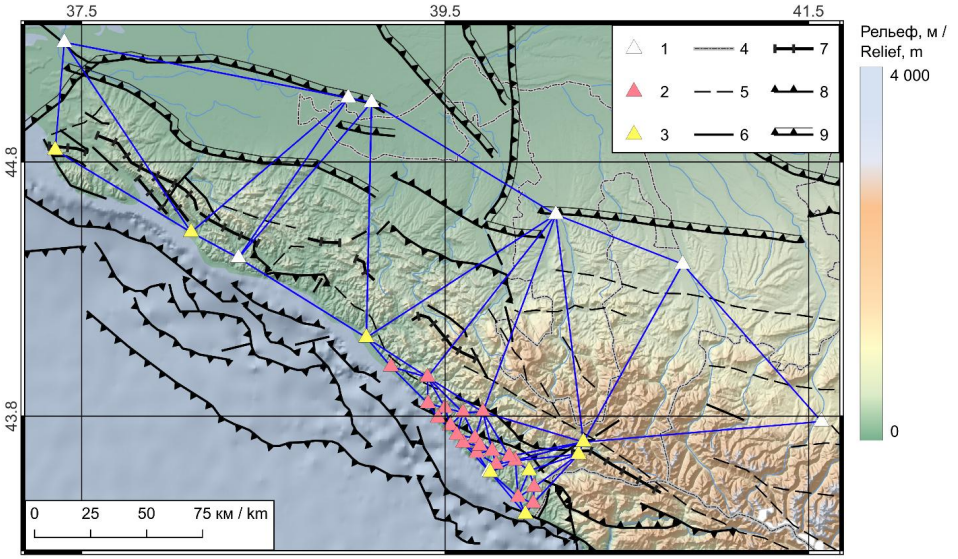

Рис. 1. Тектоническая схема района и пункты ГНСС-наблюдений, использованные в анализе. ГНСС-пункты: 1 – по данным [Milyukov et al., 2022]; 2 – по данным [Шестопалов и др., 2021]; 3 – по данным [Серебрякова, Басманов, 2014]; 4 – административные границы. Разломы: 1 – сбросо-сдвиги и сбросы; 2 – преимущественно сдвиги; 3 – взбросы и надвиги; 4 – разломы по структурно-геоморфологическим данным; 5 – флексурно-разрывные зоны /

Fig. 1. Tectonic scheme of the study area and GNSS observation sites used in the analysis. GNSS sites: 1 – from [Milyukov et al., 2022]; 2 – from [Shestopalov et al., 2021]; 3 – from [Serebryakova, Basmanov, 2014]; 4 – administrative boundaries. Faults: 1 – normal-slip strike-slip and normal faults; 2 – predominantly strike-slip faults; 3 – reverse faults and thrusts; 4 – faults identified from structural and geomorphological data; 5 – flexure-fault zones

Продольная зональность осложнена поперечной разломно-блоковой сегментацией. Для интерпретации деформаций особенно важны Пшехско-Адлерская, Туапсинская и Анапская ступени, а в районе Большого Сочи – Мзымтинский, Пластунский, Монастырский, Краснополянский и Бекишейский разломы. Сочи–Краснополянский узел относится к участкам повышенной структурной неоднородности и сейсмотектонической активности [Горбатиков и др., 2015; Стогний и др., 2022; Свалова, Заалишвили, 2024; Шестопалов и др., 2021]. На более широком Кавказском профиле современные деформации согласуются с активным сокращением и блоковым перераспределением движений [Kadirov et al., 2024; Yusubov et al., 2025].

Методы исследования

Исходный массив составили опубликованные горизонтальные скорости ГНСС-пунктов Западного Кавказа и сопредельных территорий [Серебрякова, Басманов, 2014; Шестопалов и др., 2021; Milyukov et al., 2022]. В анализ включены 54 пункта: 21, 8 и 25 пунктов соответственно. Использовались решения постоянных станций и кампаний наблюдений, если источник содержал компоненты скорости, модуль и азимут либо графическое представление, допускающее восстановление вектора.

Первичные ГНСС-наблюдения повторно не обрабатывались. Картографические схемы геопривязывались в среде QGIS. Для каждого вектора оцифровывались его начало и конец; с учётом приведённого в источнике масштаба определялись модуль, азимут и компоненты скорости V_E и V_N. Координаты и атрибуты проверялись сопоставлением с исходной схемой. Графическая оцифровка вносит дополнительную неопределённость, зависящую от масштаба, разрешения и толщины условных знаков, поэтому локальные амплитуды интерпретировались осторожно.

Деформационный анализ выполнялся по объединённому набору горизонтальных скоростей в конечно-элементном приближении [Есиков, 1991; Кафтан и др., 2019; Маневич и др., 2023]. Оси n и e направлены соответственно на север и восток. Для каждого элемента определялись компоненты тензора горизонтальной деформации и рассчитывались главные деформации, дилатация и полный сдвиг:

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix}, \# \quad (1)$$

где элементы тензора равны $\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$, $\varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$ и $\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n}\right)$, соответственно, а $\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en}$ – относительный сдвиг.

Рассчитывались следующие инвариантные деформационные характеристики:

– Главные деформации ε_1 и ε_2:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}\left[\varepsilon_n + \varepsilon_e \pm \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2}\right], \# \quad (2)$$

– Дилатация:

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \# \quad (3)$$

– Полный сдвиг:

$$\gamma = \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2}, \# \quad (4)$$

Набор [Серебрякова, Басманов, 2014] основан на четырёх циклах повторных измерений 2009–2012 гг. и опубликован в локальной системе ΔX–ΔY. Данные [Шестопалов и др., 2021] получены по рядам длительностью 4,2–9,1 года и приведены в ITRF2014. Региональный набор [Milyukov et al., 2022] охватывает 2016–2021 гг.; из него использованы 25 решений в ITRF2014. Методическая основа локального мониторинга Кавказа

и требования к геодезическим сетям рассмотрены также в работах [Ященко, Ямбаев, 2007; Савиных и др., 2010].

Различия длительности рядов, плотности сети, систем отсчёта и способа публикации данных ограничивают прямое сравнение абсолютных скоростей. Поэтому совместная интерпретация сосредоточена на пространственных градиентах и инвариантных характеристиках деформации, не изменяющихся при добавлении единого жёсткого переноса. Подобные задачи объединения разнородных полей скоростей требуют контроля преобразований и неопределённостей [Rastbood et al., 2024; Castro-Perdomo et al., 2025]. Полученные локальные экстремумы следует рассматривать как модельные оценки, а не как независимые измерения напряжений.

Результаты исследования

В ITRF2014 опубликованное поле Западного Кавказа характеризуется преимущественным движением на северо-северо-восток со скоростями около 27–28 мм/год [Milyukov et al., 2022]. Относительно стабильной Евразии проявляются внутрипоясные различия: в пределах Большого Кавказа и Западно-Кубанского прогиба преобладает поперечное сжатие, в Предкавказье заметнее сдвиговая компонента, а восточнее Туапсинской зоны разломов отмечено локальное продольное растяжение [Steblov et al., 2023; Гурбанов и др., 2023].

В Сочи–Краснополянском районе наблюдения на пунктах Сочи, Адлер, Лесное, Эсто-Садок и Аибга согласуются с активностью Мзымтинского разлома и левосдвиговой составляющей движений; на западном фланге Туапсинско-Сочинской зоны выявлена роль поперечных нарушений [Бабешко и др., 2019; Шестопалов и др., 2021]. Эти результаты задают структурный контекст для моделей, рассчитанных по объединённому массиву.

Поле скорости дилатации имеет мозаично-блоковый характер и в целом вытянуто в северо-западном направлении (рис. 2). Положительные значения, соответствующие площадному растяжению, образуют локальные максимумы в северо-западном, центрально-западном и центрально-южном секторах. Отрицательные значения выделяются в западно-центральной части и на юго-восточном фланге. Узкие переходы между областями разного знака тяготеют к разломным границам и узлам пересечения нарушений.

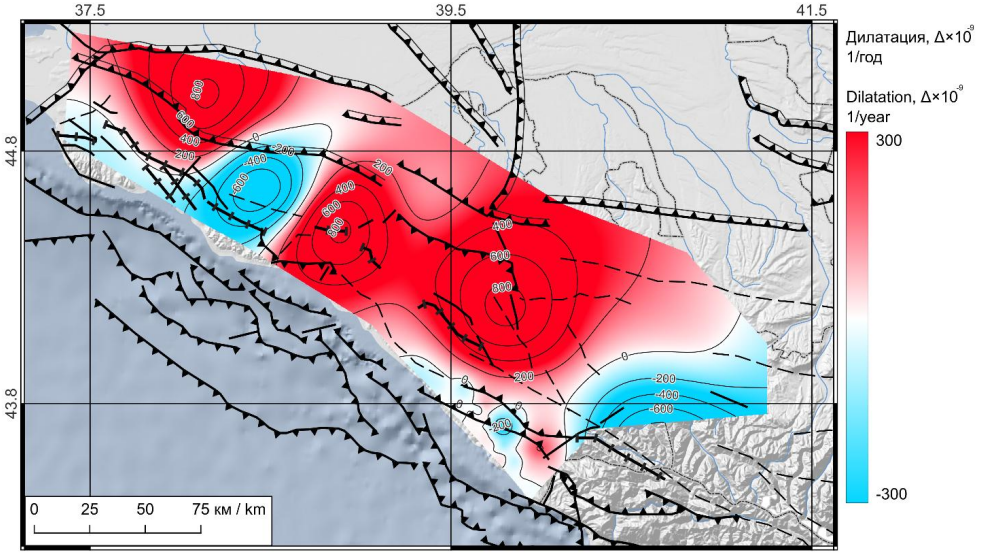

Рис. 2. Распределение скорости дилатации земной поверхности, Δ, 10^{-9} год$^{-1}$ / Fig. 2. Distribution of surface dilatation rate, Δ, 10^{-9} yr^{-1}

Скорость полного сдвига γ сильнее локализована в линейных и узловых зонах (рис. 3). Наиболее высокие значения наблюдаются на северо-западе и в централь-

ной части поля; повышенный уровень сохраняется также на юго-восточном фланге. Минимумы приурочены к северо-центральному участку и узкой прибрежной полосе. Частичное совпадение максимумов полного сдвига с границами смены знака дилатации указывает на разделение соседних кинематических режимов, однако количественная оценка локальных амплитуд ограничена неоднородностью исходных данных.

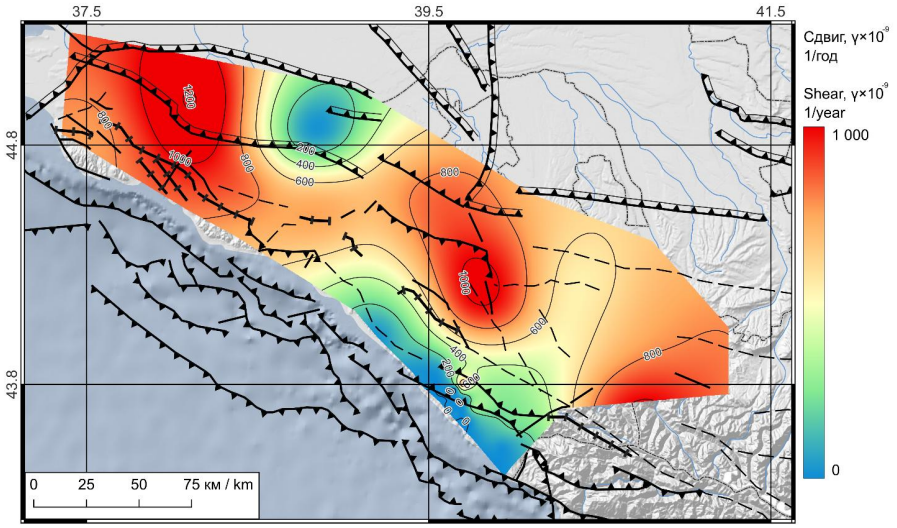

Рис. 3. Распределение скорости полного сдвига земной поверхности, γ, 10^{-9} год$^{-1}$ /
Fig. 3. Distribution of total shear strain rate, γ, 10^{-9} yr^{-1}

Ориентации главных деформаций подтверждают анизотропный и сегментированный характер поля (рис. 4). В северной и западной частях оси относительно упорядочены, тогда как в сочинском прибрежно-горном узле их азимут быстро меняется на малых расстояниях. Такое сочетание согласуется с наложением продольного сжатия, локального растяжения и сдвиговой переработки по поперечным и кососекущим нарушениям.

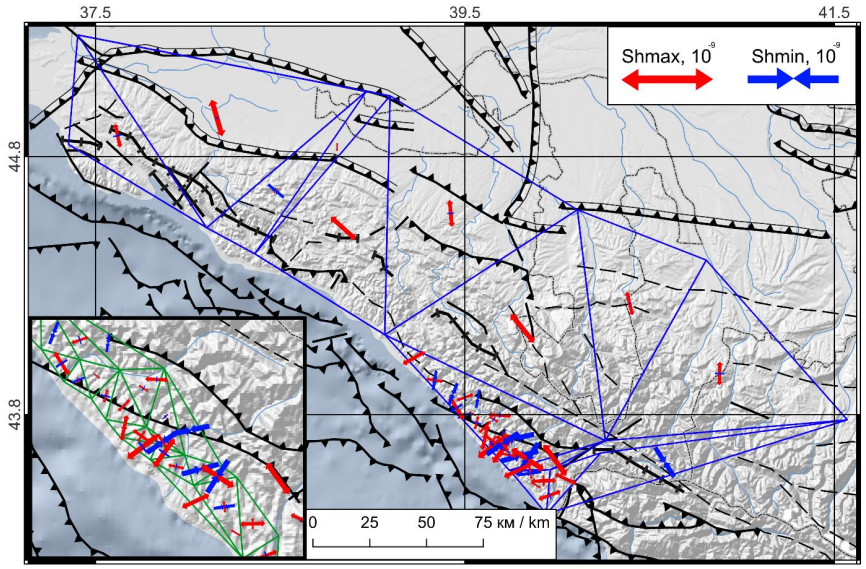

Рис. 4. Распределение скоростей главных деформаций и ориентации их осей, ε_1, ε_2, 10^{-9} год$^{-1}$ /
Fig. 4. Distribution of principal strain rates and orientations of their axes, ε_1, ε_2, 10^{-9} yr^{-1}

Совместный анализ моделей показывает, что деформационное поле Туапсе–Сочинского сегмента асимметрично и пространственно неоднородно. Контрасты приурочены к линейным нарушениям и их пересечениям, а наиболее сложная смена режимов наблюдается в сочинском узле. Эта картина согласуется с региональным разделением

деформаций, установленным по независимым ГНСС-решениям Кавказа [Kadirov et al., 2024; Kazimov et al., 2026]. Вместе с тем карты описывают кинематику поверхности; выводы о повреждённости или неупругом поведении пород требуют независимых геологических и геофизических данных.

Анализ конфигурации региональной геодинамической сети

Локальная сеть мониторинга развивает ранее предложенный подход к наблюдениям в Сочи–Краснополянском районе [Ященко, Ямбаев, 2007; Савиных и др., 2010]. Опубликованные решения охватывают ключевые узлы, но плотность пунктов уменьшается на западном, северо-западном и периферийных участках, поэтому часть межблоковых границ разрешена хуже [Шестопалов и др., 2021].

Тензор деформации можно оценивать по конечным элементам, вершинами которых служат пункты наблюдений, либо по интерполированному полю скоростей. Интерполяционные методы используют расстояния и веса [Shen et al., 1996; Teza et al., 2008; Rastbood et al., 2024], но получают модельные значения в узлах регулярной сетки. Треугольный подход сохраняет прямую связь с измеренными скоростями, однако его устойчивость существенно зависит от геометрии элемента.

Отклонение треугольника от равносторонней формы увеличивает погрешность компонентов деформации [Докукин и др., 2010; Маркович, 2019]. Для количественной оценки использовано отношение радиуса описанной окружности R к радиусу вписанной окружности r [Wu et al., 2003]. Теоретический минимум R/r равен 2 и соответствует равностороннему треугольнику.

В настоящей работе приняты следующие классы: $2 \le R/r < 3$ – оптимальная форма; $3 \le R/r < 5$ – приемлемая; $5 \le R/r \le 10$ – условно приемлемая, с пониженной устойчивостью решения; $R/r > 10$ – неблагоприятная форма. Последний класс исключается из количественной интерпретации деформаций либо используется только как качественный индикатор при явном указании ограничения.

Объединённая сеть построена методом триангуляции Делоне [Делоне, 1934] после преобразования геодезических координат в проекцию UTM. Алгоритм максимизирует минимальные углы и тем самым ограничивает появление вытянутых элементов. Для каждого треугольника рассчитано R/r; результат представлен на рис. 5.

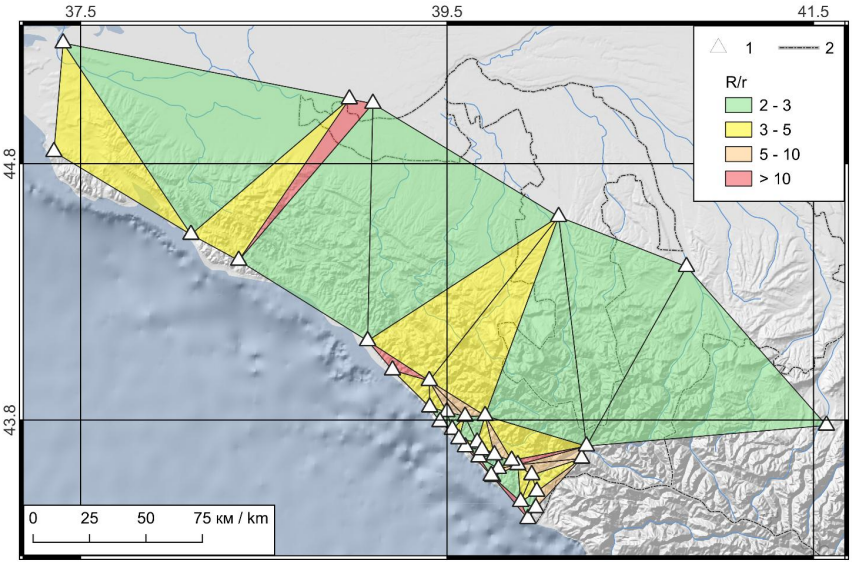

Рис. 5. Триангуляция Делоне объединённой сети Западного Кавказа и классификация конечных элементов по критерию R/r: 2–3 – оптимальные; 3–5 – приемлемые; 5–10 – условно приемлемые; >10 – неблагоприятные /

Fig. 5. Delaunay triangulation of the combined Western Caucasus network and finite-element classes based on R/r: 2–3, optimal; 3–5, acceptable; 5–10, conditionally acceptable; >10, unfavorable

Большинство внутренних элементов относится к оптимальному и приемлемому классам; условно приемлемые и неблагоприятные треугольники сосредоточены преимущественно у границ сети и в разреженных участках (рис. 5). Их автоматическое удаление без проверки может сократить область анализа и скрыть реальные периферийные градиенты, поэтому элементы с $R/r > 10$ следует исключать именно из количественной деформационной интерпретации, сохраняя сведения об исходных скоростях пунктов.

Создание постоянно действующей ГНСС-станции на базе Сочинского института РУДН само по себе лишь умеренно изменит геометрию региональной триангуляции, но обеспечит устойчивую опорную точку для приведения локальных кампаний к единой системе отсчёта и повысит временную непрерывность мониторинга. Наибольший геометрический эффект даст последующее сгущение сети в разреженных западных и северо-западных секторах.

Выводы

1. Объединённый массив из 54 опубликованных и оцифрованных ГНСС-решений подтверждает северо-северо-восточный региональный фон движений и выявляет наложенные зоны сжатия, растяжения и сдвига. В Туапсе–Сочинском сегменте поле асимметрично и мозаично, а основные контрасты тяготеют к разломным границам.

2. Явная классификация R/r показывает, что основная часть внутренних треугольников имеет оптимальную или приемлемую форму. Элементы с $R/r > 10$ сосредоточены главным образом на периферии и не должны использоваться для количественной интерпретации деформаций без дополнительного обоснования.

3. Различия систем отсчёта, длительности наблюдений и погрешность графической оцифровки ограничивают точность локальных экстремумов. Развитие непрерывных наблюдений в Большом Сочи и сгущение сети в разреженных секторах необходимы для проверки устойчивости выявленных закономерностей.

Литература

1. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Калинчук В.В., Шереметьев В.М. К проблеме оценки состояния сейсмичности в зонах повышенной геодинамики // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2012. – № 2. – С. 7–10.

2. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Глазырин Е.А., Шереметьев В.М. Исследование сейсмической активности района Большого Сочи методами спутниковой геодинамики // Наука Юга России. – 2019. – Т. 15. № 1. – С. 3–11. DOI: 10.7868/S25000640190101.

3. Горбатиков А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзебоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных // Физика Земли. – 2015. – № 1. – С. 28–39.

4. Гурбанов А.Г., Милюков В.К., Газеев В.М., Лексин А.Б., Докучаев А.Я., Гурбанова О.А. Оценка векторов скорости современных горизонтальных и вертикальных смещений литосферных блоков на территории Большого Кавказа и их геодинамическая интерпретация (по данным ГНСС) // Вестник Владикавказского научного центра. – 2023. – Т. 23. № 1. – С. 49–61. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.26.001.

5. Делоне Б.Н. О пустой сфере // Известия АН СССР. ОМЕН. – 1934. – № 4. – С. 793–800.

6. Докукин П.А., Кафтан В.И., Красноперов Р.И. Влияние формы треугольников в геодезической сети на результаты определения деформаций земной поверхности // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 5. –С. 6–11.

7. Есиков Н.П. Современные движения земной поверхности с позиции теории деформации. – Новосибирск: Наука, 1991. – 226 с.

8. Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зон-

дирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. № 1. – С. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94.

9. Макеев В.М., Ревазов М.О., Пикулик Е.А., Фикри Е.А. Структуры альпийского орогенеза южного склона западного сегмента Большого Кавказа в связи с обеспечением безопасности площадок инженерных сооружений // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. –С. 39–53. DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005.

10. Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Кафтан В.И., Урманов Д.И. Шакиров А.И. Определение и визуализация параметров движений и деформаций земной поверхности по данным ГНСС-наблюдений в среде Python 3 и QGIS 3 // Геодезия и картография. – 2023. – № 12. – С. 17–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1002-12-17-26.

11. Маркович К.И. Влияние конфигурации конечных элементов на точность определения компонентов деформации // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. № 3. – С. 37–51. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-37-51.

12. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. – М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с.

13. Савиных В.П., Демьянов Г.В., Ямбаев Х.К. Проект геодинамического мониторинга территории Сочи-Краснополянского района Олимпиады 2014 // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. –№ 1. –С. 44–50.

14. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006.

15. Серебрякова Л.И., Басманов А.В. Предварительные результаты обработки и анализа повторных геодезических измерений, выполненных на Северо-Кавказском геодинамическом полигоне Росреестра // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 44–54.

16. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.

17. Шестопалов В.Л., Сенин Б.В., Глазырин Е.А. Развитие GPS-технологий в районе Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны с учетом разломно-блоковой структуры // Наука Юга России. – 2021. – Т. 17. № 4. – С. 25–33. DOI: 10.7868/S25000640210403.

18. Ященко В.Р., Ямбаев Х.К. Геодезический мониторинг движений земной коры (по материалам Кавказского региона). – М.: МИИГАиК, 2007. – 208 с.

19. Castro-Perdomo N., Jonsson S., Klinger Y., Masson F., Becker T.W., Johnson K. Strain Rates Along the Alpine-Himalayan Belt From a Comprehensive GNSS Velocity Field // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2025. – Vol. 130. – Art. No. e2025JB031738. DOI: 10.1029/2025JB031738.

20. Ergintav S., Vernant P., Tan O., Karabulut H., Ozarpaci S. et al. Unexpected far-field deformation of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes revealed by space geodesy // Science. – 2024. – Vol. 386. No. 6719. – pp. 328–335. DOI: 10.1126/science.ado4220.

21. Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R. Mammadov S., Kazimov I., Floyd M., Reilinger R., King R. Results from 25 years (1998–2022) of crustal deformation monitoring in Azerbaijan and adjacent territory using GPS // ANAS Transactions, Earth Sciences. – 2024. – No. 1. – pp. 28–43. DOI: 10.33677/ggianas20240100107.

22. Kaftan V.I., Gvishiani A.D., Manevich A.I., Dzeboev B.A., Tatarinov V. et al. An Analytical Review of the Recent Crustal Uplifts, Tectonics, and Seismicity of the Caucasus Region // Geosciences. – 2024. – Vol. 14. – Art. No. 70. DOI: 10.3390/geosciences14030070.

23. Kazimov I., Yetirmishli G., Aktug B., Tiryakioglu I., Gezgin C. et al. Active tectonics, crustal strain fields and block behavior around the Caucasus transition zone: constraints from combined GNSS velocities // The European Physical Journal Plus. – 2026. – Vol. 141. – Art. No. 537. DOI: 10.1140/epjp/s13360-026-07748-9.

24. Milyukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Gorbatikov A.V., Steblov G. M. et al. Contemporary Tectonic Movements of the Western Caucasus and the Ciscaucasia Based on Satellite-Geodetic Observations // Geotectonics. – 2022. – Vol. 56. – pp. 41–54. DOI: 10.1134/S0016852122010058.

25. Rastbood A., Salmanian M., Hossainali M.M. Present-day crustal deformation based on an interpolated GPS velocity field in the collision zone of the Arabia-Eurasia tectonic plates // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2024. – Vol. 68. – pp. 191–215. DOI: 10.1007/s11200-023-0740-5.

26. Steblov G.M., Agibalov A.O., Beloborodov D.E., Zaitsev V.A., Perederin V.P. et al. Analysis of Contemporary Deformations of the North-Western Caucasus and Ciscaucasia Based on GNSS Data // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2023. – Vol. 59. – pp. 555–564. DOI: 10.1134/S1069351323040110.

27. Yusubov N.P., Guliyev I.S., Kerimov V.Y. Geological Structure of the Middle Kura and Shamakhi–Gobustan Troughs of the South Caspian Depression (Azerbaijan): Results of Interpretation of Seismological Data and GPS Monitoring // Geotectonics. – 2025. – Vol. 59. – pp. 328–338. DOI: 10.1134/S0016852125700256.

28. Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1996. – Vol. 101. – pp. 27957–27980. DOI: 10.1029/96JB02544.

29. Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments // Computers and Geosciences. – 2008. – Vol. 34. No. 9. – pp. 1142–1153. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.07.006.

30. Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated // Journal of Geodesy and Geodynamics. – 2003. – Vol. 23. No. 3. – pp. 26–30. (In Chinese).

References

1. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Kalinchuk V.V., Sheremetev V.M. On the problem of assessing seismicity in zones of increased geodynamic activity. Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation. 2012. No. 2. pp. 7–10. (In Russ.)

2. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Glazyrin E.A., Sheremetev V.M. Investigation of seismic activity in the Greater Sochi area by satellite geodynamics methods. Science in the South Russia. 2019. Vol. 15. No. 1. pp. 3–11. DOI: 10.7868/S25000640190101. (In Russ.)

3. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Yu., Kharazova Yu.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Dzeboev B.A., Gabaraev A.F. Features of the deep structure and modern tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector based on a complex of geophysical data. Physics of the Solid Earth. 2015. No. 1. pp. 28–39. (In Russ.)

4. Gurbanov A.G., Milyukov V.K., Gazeev V.M., Leksin A.B., Dokuchaev A.Ya., Gurbanova O.A. Estimation of velocity vectors of modern horizontal and vertical displacements of lithospheric blocks in the Greater Caucasus and their geodynamic interpretation from GNSS data. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2023. Vol. 23. No. 1. pp. 49–61. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.26.001. (In Russ.)

5. Delaunay B.N. On the empty sphere. Izvestiya Academii Nauk SSSR. OMEN. 1934. No. 4. pp. 793–800. (In Russ.)

6. Dokukin P.A., Kaftan V.I., Krasnoperov R.I. Influence of triangle shape in a geodetic network on the results of determining surface deformations. Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying. 2010. No. 5. pp. 6–11. (In Russ.).

7. Esikov N.P. Modern movements of the Earth's surface from the standpoint of deformation theory. Novosibirsk. Nauka . 1991. 226 p. (In Russ.)

8. Kaftan V.I., Gvishiani A.D., Morozov V.N., Tatarinov V.N. Methodology and results of determining crustal movements and deformations from GNSS data at a geodynamic test site in a radioactive-waste disposal area. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2019. Vol. 16. No. 1. pp. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94. (In Russ.)

9. Makeev V.M., Revazov M.O., Pikulik E.A., Fikri E.A. Structures of Alpine orogenesis on the southern slope of the western segment of the Greater Caucasus in relation to the safety of engineering-facility sites. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 39–53. DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005. (In Russ.)

10. Manevich A.I., Shevchuk R.V., Losev I.V., Kaftan V.I., Urmanov D.I., Shakirov A.I. Determination and visualization of parameters of surface movements and deformations from GNSS observations in Python 3 and QGIS 3. Geodesy and Cartography. 2023. No. 12. pp. 17–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1002-12-17-26. (In Russ.)

11. Markovich K.I. Influence of finite-element configuration on the accuracy of determining deformation components. Vestnik SSUGT. 2019. Vol. 24. No. 3. pp. 37–51. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-37-51. (In Russ.)

12. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatikov A.V. Endogenous Hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS. 2014. 256 p. (In Russ.)

13. Savinykh V.P., Demyanov G.V., Yambaev Kh.K. Geodynamic monitoring project for the Sochi–Krasnaya Polyana area of the 2014 Olympics. Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying. 2010. No. 1. pp. 44–50. (In Russ.)

14. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus–Anatolian region. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006. (In Russ.)

15. Serebryakova L.I., Basmanov A.V. Preliminary results of processing and analysis of repeated geodetic measurements at the Rosreestr North Caucasian geodynamic test site. Geodesy and Cartography. 2014. No. 4. pp. 44–54. (In Russ.)

16. Stogniy V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: monitoring problems. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003. (In Russ.)

17. Shestopalov V.L., Senin B.V., Glazyrin E.A. Development of GPS technologies in the Tuapse–Sochi seismically active zone with regard to the fault-block structure. Science in the South Russia. 2021. Vol. 17. No. 4. pp. 25–33. DOI: 10.7868/S25000640210403. (In Russ.)

18. Yashchenko V.R., Yambaev Kh.K. Geodetic monitoring of crustal movements: evidence from the Caucasus region. Moscow. MIIGAiK. 2007. 208 p. (In Russ.)

19. Castro-Perdomo N., Jonsson S., Klinger Y., Masson F., Becker T.W., Johnson K. Strain Rates Along the Alpine-Himalayan Belt From a Comprehensive GNSS Velocity Field. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2025. Vol. 130. Art. No. e2025JB031738. DOI: 10.1029/2025JB031738.

20. Ergintav S., Vernant P., Tan O., Karabulut H., Ozarpaci S. et al. Unexpected far-field deformation of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes revealed by space geodesy. Science. 2024. Vol. 386. No. 6719. pp. 328–335. DOI: 10.1126/science.ado4220.

21. Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R. Mammadov S., Kazimov I., Floyd M., Reilinger R., King R. Results from 25 years (1998–2022) of crustal deformation monitoring in Azerbaijan and adjacent territory using GPS. ANAS Transactions, Earth Sciences. 2024. No. 1. pp. 28–43. DOI: 10.33677/ggianas20240100107.

22. Kaftan V.I., Gvishiani A.D., Manevich A.I., Dzeboev B.A., Tatarinov V. et al. An Analytical Review of the Recent Crustal Uplifts, Tectonics, and Seismicity of the Caucasus Region. Geosciences. 2024. Vol. 14. Art. No. 70. DOI: 10.3390/geosciences14030070.

23. Kazimov I., Yetirmishli G., Aktug B., Tiryakioglu I., Gezgin C. et al. Active tectonics, crustal strain fields and block behavior around the Caucasus transition zone: constraints from combined GNSS velocities. The European Physical Journal Plus. 2026. Vol. 141. Art. No. 537. DOI: 10.1140/epjp/s13360-026-07748-9.

24. Milyukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Gorbatikov A.V., Steblov G. M. et al. Contemporary Tectonic Movements of the Western Caucasus and the Ciscaucasia Based on Satellite-Geodetic Observations. Geotectonics. 2022. Vol. 56. pp. 41–54. DOI: 10.1134/S0016852122010058.

25. Rastbood A., Salmanian M., Hossainali M.M. Present-day crustal deformation based on an interpolated GPS velocity field in the collision zone of the Arabia-Eurasia tectonic plates. Studia Geophysica et Geodaetica. 2024. Vol. 68. pp. 191–215. DOI: 10.1007/s11200-023-0740-5.

26. Steblov G.M., Agibalov A.O., Beloborodov D.E., Zaitsev V.A., Perederin V.P. et al. Analysis of Contemporary Deformations of the North-Western Caucasus and Ciscaucasia Based on GNSS Data. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2023. Vol. 59. pp. 555–564. DOI: 10.1134/S1069351323040110.

27. Yusubov N.P., Guliyev I.S., Kerimov V.Y. Geological Structure of the Middle Kura and Shamakhi–Gobustan Troughs of the South Caspian Depression (Azerbaijan): Results of Interpretation of Seismological Data and GPS Monitoring. Geotectonics. 2025. Vol. 59. pp. 328–338. DOI: 10.1134/S0016852125700256.

28. Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1996. Vol. 101. pp. 27957–27980. DOI: 10.1029/96JB02544.

29. Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. Computers and Geosciences. 2008. Vol. 34. No. 9. pp. 1142–1153. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.07.006.

30. Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated. Journal of Geodesy and Geodynamics. 2003. Vol. 23. No. 3. pp. 26–30. (In Chinese)