












УДК 551.242.1

DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

Оригинальная статья

Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга восточных ветвей Владикавказского разлома

А.И. Маневич ^{1,2}, Б.А. Дзедобоев ^{1,3,4}, А.Д. Гвишиани ^{1,3}, В.И. Кафтан ¹,
В.Н. Татаринев ^{1,3}, Б.В. Дзеранов ^{1,4}, В.Б. Заалишвили ^{1,4}, И.В. Лосев ¹,
Д.Ж. Акматов ^{1,2}, Р.В. Шевчук ^{1,3}, А.Ф. Габараев ⁴

¹ Геофизический центр РАН, Россия, 119296, г. Москва, ул. Молодёжная, 3,
e-mail: a.manevich@gcras.ru;

² Горный институт НИТУ «МИСИС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр., 4;

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1;

⁴ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 18.06.2024, доработана: 03.08.2024, принята к публикации: 05.08.2024

Резюме: Актуальность работы. В статье представлены результаты работ, направленных на развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга восточных ветвей Владикавказского разлома на территории Республики Северная Осетия-Алания. Территория республики отличается высокой плотностью геодезических сетей: государственных, научных и коммерческих. Однако представленные ранее исследования не предусматривали использование государственных геодезических пунктов, а также построение на их основе равномерно распределенной по территории республики геодезической сети. **Целью исследования**, в рамках настоящей статьи, являлось формирование геодезической сети для деформационного ГНСС-мониторинга восточной части и отдельно узла сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома. **Методы исследования.** Сформированный полигон основывается на государственных геодезических пунктах, скальных центрах, заложенных коллективом авторов, и пунктах постоянно действующих сетей. Выполнены исследования по совершенствованию методики оценки точности ГНСС-измерений, связанные с особенностями горных физико-географических условий. Методика полевого контроля точностных характеристик комплектов ГНСС-аппаратуры, позволяет без эталонных построений в полевых условиях осуществлять контроль по одиночной базовой линии. **Результаты исследования.** Важным аспектом является применение методики к новым типам ГНСС-антенн, ранее не исследованных, включая choke-ring, а также антенн китайского производства с китайскими платами GNSS, которые в настоящий момент все чаще применяются на территории РФ. Обработка наблюдений по разработанному алгоритму позволила сравнить номинальные параметры ГНСС-антенн с их фактическими характеристиками и учесть фактические положения фазового центра. В сентябре 2023 г. на территории сформированного Осетинского геодинимического полигона выполнен первый цикл наблюдений за СДЗК средствами ГНСС. Первые результаты показали, что основное количество СКО положения пунктов в плане группируется в диапазоне 2–3 мм, а по высоте в диапазоне 3–5 мм. Средние значения СКО в плане и по высоте составили 3 мм и 6 мм соответственно.

Ключевые слова: геодинимический полигон, геодезическая сеть, ГНСС станция, антенна, обработка результатов, данные, ГНСС-измерения.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор)» (проект №23-17-00176). В работе использовалось оборудование и материалы, предоставленные ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>). В работе использовалось оборудование, данные и материалы, предоставленные Единой геофизической службой РАН.












Для цитирования: Маневич А.И., Дзобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Дзеранов Б.В., Заалишвили В.Б., Лосев И.В., Акматов Д.Ж., Шевчук Р.В., Габараев А.Ф. Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга восточных ветвей Владикавказского разлома. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 41-56. DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

Original paper

Development of the deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz fault

A.I. Manevich ^{1,2}, B.A. Dzeboev ^{1,3,4}, A.D. Gvishiani ^{1,3}, V.I. Kaftan ¹,
V.N. Tatarinov ^{1,3}, B.V. Dzeranov ^{1,4}, V.B. Zaalishvili ^{1,4}, I.V. Losev ¹,
D.Zh. Akmatov ^{1,2}, R.V. Shevchuk ^{1,3}, A.F. Gabaraev ⁴

¹ Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, 3 Molodezhnaya Str., Moscow 119296, Russian Federation, e-mail: a.manevich@gcras.ru;

² Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”,
4 Ave. Leninskiy, Moscow 119049, Russian Federation;

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
10/1 Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123995, Russian Federation;

⁴ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 18.06.2024, revised: 03.08.2024, accepted: 05.08.2024

Abstract: Relevance. This article presents the results of work aimed at developing a deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz Fault in the Republic of North Ossetia-Alania. The region is characterized by a high density of geodetic networks, including state, scientific, and commercial networks. However, previous studies did not incorporate the use of state geodetic points or the establishment of a geodetic network uniformly distributed across the republic. **The aim of the study,** development of a network for deformation GNSS monitoring in the eastern and western branches of the Vladikavkaz fault. **Research methods.** The developed test site is based on state geodetic points, rock centers laid by the team of authors, and points of permanent networks. Research was conducted to improve the methodology for assessing the accuracy of GNSS measurements, considering the specific mountain physical and geographical conditions. The field control methodology for GNSS equipment accuracy allows for in-field control using a single baseline without reference constructions. **Research results.** Similar experiments were previously conducted in flat terrain conditions. An important aspect is the application of the method to new types of GNSS antennas that have not been previously studied, including choke-rings, as well as Chinese-made antennas with Chinese CHCNAV boards, which are currently increasingly used in the Russian Federation. Processing observations using the developed algorithm made it possible to compare the nominal parameters of GNSS antennas with their actual characteristics and take

into account the actual positions of the phase center. In September 2023, the first observation cycle for modern crustal movements using GNSS was conducted at the newly established Ossetian geodynamic test site. The initial results indicated that most of the standard deviations for point positions in plan view were in the range of 2–3 mm, and in height, 3–5 mm. The average standard deviations values in plan view and height were 3 mm and 6 mm, respectively.

Keywords: geodynamic test site, geodetic network, GNSS station, antenna, results processing, data, GNSS measurements.

Acknowledgements: *The research was supported by Russian science foundation “System Seismic Hazard Assessment of the Central Part of the Greater Caucasus (Ossetian sector)” (project №23-17-00176). This work employed facilities and data provided by the Shared Research Facility “Analytical Geomagnetic Data Center” of the Geophysical Center of RAS (<http://ckp.gcras.ru/>). This work employed facilities and data provided by the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences.*

For citation: Manevich A.I., Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Dzeranov B.V., Zaalishvili V.B., Losev I.V., Akmatov D.Zh., Shevchuk R.V., Gabaraev A.F. Development of the deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz fault. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 41-56. DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

Введение

Территория Большого Кавказа характеризуется блоковыми движениями с интенсивными вертикальными и горизонтальными перемещениями и образованием линейных тектонических депрессий, вытянутых вдоль Главного Кавказского хребта. Северное крыло Большого Кавказа представлено пологой моноклиной, погружающейся на север, где она ограничивается линейно вытянутой зоной глубинных разломов, наиболее выраженных вдоль северо-западного (Ахтырский) и юго-восточного (Владикавказский) окончаний [Милановский, 1968]. Формирование этой структуры связано с напряжениями субгоризонтального сжатия. При этом, в целом, северная часть Большого Кавказа изучена недостаточно для надежной оценки сейсмической опасности, особенно в части развития деформационных процессов.

Северный Кавказ является наиболее геодинамически активным регионом европейской части Российской Федерации, что способствовало его активному геологическому и геофизическому изучению и освоению на протяжении последних 200 лет [Милановский, 1968; Белоусов, 1982; Шолпо и др., 1993; Ismail-Zadeh et al., 2020]. Считается, что сеймотектоническое деформирование верхней части земной коры Кавказа соответствует обстановке надвигообразования при субгоризонтальной ориентации главной оси сжатия (в северосеверовосточном направлении) и субвертикальной ориентации главной оси растяжения, что подтверждается по данным ГНСС-наблюдений [McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Шевченко и др., 2014; Лукк, Шевченко, 2019].

В этой связи на территории Горной Осетии стали активно развиваться локальные исследования современных движений земной коры методами ГНСС-измерений. Первые результаты были получены в 2009–2011 годы. В рамках этих работ были созданы два геодинамических полигона: один ориентированный на мониторинг восточных ветвей Владикавказского разлома [Певнев и др., 2014], второй пересекающий главный Кавказский хребет по территории Северной и Южной Осетии [Милуков и др., 2011; 2014]. За следующие 10 лет наблюдений научными коллективами Геофизического института ВНИИ РАН, Государственной астрономической обсерватории МГУ им. П.К. Штенберга и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН были получены важные теоретические и практические результаты. Одной из главных особенностей геодинамического полигона Осетинского сектора Большого

Кавказа является комплексирование результатов геодезических измерений с результатами геолого-геофизических исследований [Рогожин и др., 2015; Стогний и др., 2023; Стогний, Стогний, 2024]. Результаты комплексных исследований позволили построить региональную модель сейсмических скоростей, в которой четко проявляются сейсмогенерирующие структуры [Рогожин и др., 2015]. На южном склоне Большого Кавказа такая структура проявила себя сильным землетрясением 1991 г. (Рачинское, I=9 баллов, M=7.2) [Арефьев и др., 2006; Тихоцкий и др., 2011], а на северном – следы сильных землетрясений были изучены с применением палеосейсмологического метода (Владикавказский разлом) [Овсюченко и др., 2008]. Важной особенностью глубинного строения в Осетинском секторе является наличие на профиле ММЗ на глубине 9–45 км клинообразного в разрезе, низкоскоростного тела (до -5дБ относительно региональной скоростной модели) [Рогожин и др., 2015].

Все это определяет актуальность системного изучения взаимосвязи современных движений с разломной тектоникой, пространственным расположением сейсмических событий и результатами численного моделирования напряжённо-деформированного состояния Осетинского сектора Большого Кавказа. Высокая степень изученности современных движений и опыт эксплуатации научных геодезических сетей в регионе за последние 15 лет позволяют сделать выводы, на основе которых целесообразно реализовать новый этап развития Осетинского геодинамического полигона. Нужно отметить, что ранее научными коллективами незаслуженно игнорировались широкие возможности эксплуатации государственных геодезических сетей, которые представляют собой надежные конструкции геодезических центров, заложенных на всей территории Республики Северная Осетия-Алания. Их совместное использование позволяет сформировать широкую развернутую сеть, равномерно покрывающую территорию исследования. Эти данные, по сути, станут главным ресурсом для дальнейшего изучения геодинамического режима территории в перспективе. Комплексные исследования позволят получить уникальный набор геолого-геофизических данных, которые могут существенно развить понимание геодинамических и сейсмотектонических процессов в Осетинском секторе Большого Кавказа.

Методы исследования

Для выполнения ГНСС-измерений в районе исследований на долговременной основе необходимо сформировать надежную геодезическую сеть деформационного мониторинга. С этой целью в рамках полевых работ решались две задачи:

- поиск и обследование существующих геодезических пунктов государственных, научных и коммерческих сетей;
- закладка новых геодезических пунктов собственными силами.

Полевые работы были начаты с поиска и обследования существующих геодезических пунктов в районе исследований. Территория Республики Северная Осетия-Алания отличается высоким уровнем развития геодезического обеспечения. В районе исследований присутствуют следующие геодезические сети:

- совместная научная геодезическая сеть Государственного астрономического института им. П.К. Штенберга МГУ (ГАИШ) и Владикавказского научного центра (ВНЦ) РАН, охватывающая территории Северной и Южной Осетии [Мионов и др., 2021];

- научная геодезическая сеть Геофизического института ВНИЦ РАН, локализованная в районе восточных ветвей Владикавказской группы разломов [Певнев и др., 2014];
- научная геодезическая сеть постоянно-действующих станций Геофизической службы РАН (<https://sofgsras.ru/nablyudeniya/set-kompleksnykh-nablyudenij/>);
- постоянно-действующие пункты коммерческих геодезических сетей АО «ПРИН», EFT Group, АО «Русгеоком» и других (<https://portal.fppd.cgkipd.ru/main/>);
- пункты государственной геодезической сети, принадлежащие публично-правовой компании (ППК) «Роскадастр» (<https://cgkipd.ru/fsdf/ggs/monitoring-ggs/>).

Основу формируемой геодезической сети составили в первую очередь пункты государственной геодезической сети. Это связано с тем, что пункты государственной геодезической сети закладывались таким образом, чтобы равномерно покрывать территорию республики, а геодезический центр надежно и профессионально устанавливался в грунтовое или скальное основание, что повышает его долговременную устойчивость и позволяет измерять именно движения земной поверхности (рис. 1) [Правила ..., 1993; 2001].



Рис. 1. Типы геодезических центров на Осетинском геодинамическом полигоне.
 а – грунтовые свайные центры (тип 147) (пункты ППК «Роскадастр») [Правила ..., 1993];
 б – грунтовые анкерные центры (тип 162) (пункты ППК «Роскадастр») [Правила ..., 1993];
 с – скальные центры (пункты ППК «Роскадастр») [Правила..., 1993]; д – скальный центр с принудительным центрированием, резьба М4.5 [Миронов и др., 2021] (пункты ВНИЦ РАН и ГАИШ МГУ); е – скальный центр с принудительным центрированием, резьба 5/8 дюйма [Маневич и др., 2022] (пункты Геофизического центра РАН); ф – вставной трубчатый центр с адаптером [Певнев и др., 2014] (пункт ГФИ ВНИЦ РАН) /

Fig. 1. Types of geodetic centers at the Ossetian geodynamic test site.
 а – Ground pile centers (type 147) (points of PPK “Roskadastr”) [Rules ..., 1993]; б – Ground anchor centers (type 162) (points of PPK “Roskadastr”) [Rules ..., 1993]; с – Rock centers (points of PPK “Roskadastr”) [Rules..., 1993]; д – Rock center with forced centering, thread M4.5 [Mironov et al., 2021] (point of GPI VSC RAS and GAISH MSU); е – rock center with forced centering, 5/8 inch thread [Manevich et al., 2022] (point of Geophysical Center RAS); ф – inserted tubular center with adapter [Pevnev et al., 2014] (point of GPI VSC RAS)

Несмотря на то, что пункты научных сетей ГАИШ МГУ и ВНИЦ РАН являются центрами с принудительным центрированием (что положительно сказывается на стабильности ГНСС-измерений) в большинстве своем их закладка и условия

для приема сигналов ГНСС находятся на невысоком уровне качества. Преимущественно центры установлены в крыши домов, заброшенные фундаменты зданий либо расположены в залесенной местности. Пункты ППК «Роскадастр» в своем большинстве лишены указанных недостатков. В результате рекогносцировочных работ было задокументировано и оценено состояние 114 геодезических пунктов (21 – ГФИ ВНИЦ РАН, 87 – ППК «Роскадастр», 6 – ГАИШ МГУ).

Пункты государственной геодезической сети в большинстве своем находятся недалеко от населенных пунктов, т.к. служат в первую очередь для геодезического обеспечения строительных и кадастровых работ. А для сети деформационного мониторинга необходимо сформировать сеть, равномерно охватывающую исследуемую территорию. Для решения этой задачи выполнен комплекс полевых работ по закреплению новых геодезических пунктов с использованием скальных геодезических центров. Скальный геодезический центр представляет собой латунный цилиндрический стержень длиной 150 мм, с одиночным пропилом в нижней части стержня шириной 20 мм и глубиной 40 мм. Для лучшей адгезии с раствором на стержне пропилены два витка кольцевых зазоров и дополнительные опоясывающие витки глубиной в 1 мм. В качестве распирающего элемента принят клин высотой 40 мм с шириной верхней кромки в 10 мм. Диаметр скважины для установки центра составляет 32 мм. Фотография и схема конструкции представлена на рис. 1д, 2. В качестве строительной смеси использована цементно-бетонная мастика в жидком состоянии (примерные соотношения – 1 часть цемента, 2 части мелкозернистого песка, 3 части воды). Несмотря на то, что жидкая цементно-бетонная смесь имеет наибольшее время застывания и набора прочности, ее консистенция позволяет надежно заполнить все пустоты между скальным центром и стенками скважины. Вторым важным аспектом ее применения является то, что в отличие от вязкоупругих смесей она не придает стержню упругого выгаливания при расклинивании центра. Технология выполнения работ по закладке центров подробно изложена в статье [Маневич и др., 2022].

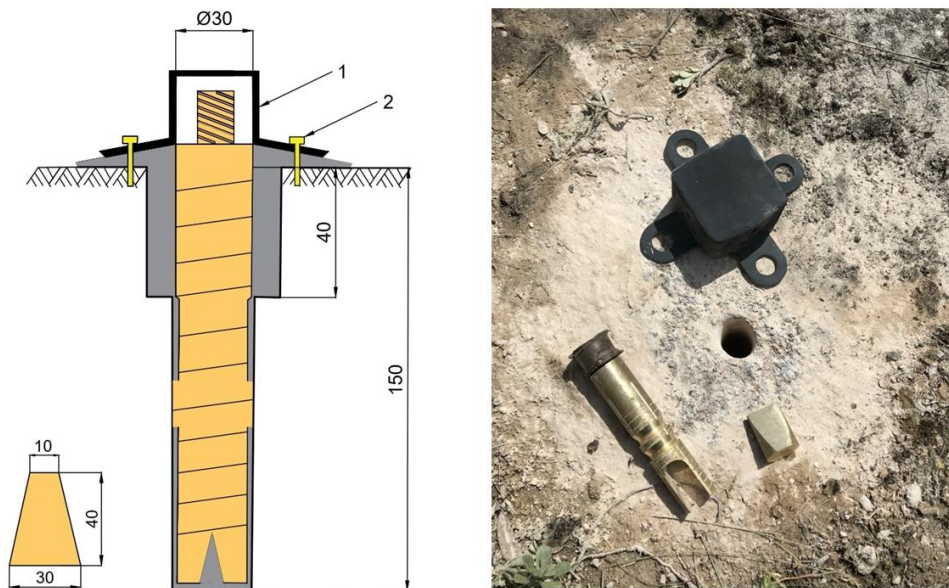


Рис. 2. Схема и общий вид конструкции скального геодезического центра (все размеры даны в миллиметрах). 1 – защитный колпак; 2 – строительный анкер с гайкой /

Fig. 2. Schematic diagram and general view of the rock surveying center structure (all dimensions are given in millimeters). 1 – protective cap; 2 – construction anchor with nut

В период с 10 июня по 20 сентября 2023 г. экспедиционной группой Геофизического центра РАН были проведены рекогносцировочные и геодезические работы. При установке скальных геодезических центров по возможности соблюдались следующие принципы выбора места для закладки новых центров [Маневич и др., 2022]:

- Долговременная сохранность и стабильность положения скального центра с точки зрения физико-географических условий (исключить расположение пунктов на участках, подверженных локальным деформациям пород (оползневые склоны), сезонному подтоплению, заболачиванию и перспективной хозяйственной деятельности);

- Наличие условий для качественного приема спутниковых сигналов (место должно находиться на возвышении, отсутствие препятствий и помех для приема радиосигнала);

- Расположение новых мест должно быть в районе простирающихся Восточных ветвей Владикавказского разлома, для формирования равномерной геодезической сети в районе исследований;

- Создание оптимальной геометрии геодезической сети, а именно увеличение числа треугольников близких к равносторонним (для снижения погрешности определения компонент деформаций) и регулярного покрытия исследуемой территории;

- Транспортная доступность скального центра.

При выборе мест размещения геодезических центров, обследование местности и поиск возможных путей подъезда выполнялись с применением автомобиля повышенной проходимости и пешими маршрутами. Топографическая привязка участков и запись треков дорожной сети осуществлялись с помощью ГЛОНАСС/GPS-навигатора GARMIN eTrex 10. В результате было закреплено на местности 9 скальных геодезических центров – UNL1, KRC1, BTRG, KBN1, KBN2, BLT3, CHMI, DZIV, SUAD. Схема новых геодезических центров на рис. 3а. Общий вид некоторых скальных центров приведен на рис. 3б,в. Демонстрация установки скального центра представлена на видео – https://www.youtube.com/watch?v=98ta_fDUmac.

В результате работ сформирована геодезическая сеть для деформационного ГНСС-мониторинга восточной части и отдельно узла сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома. Сеть позволяет сформировать хорошую геометрию конечных элементов-треугольников для вычисления плановых деформаций [Wu et al., 2003], что было невозможно в рамках эксплуатации отдельных научных или государственных сетей. Сеть включает в себя 35 пунктов, определяемых в ходе полевых кампаний (1 пункт ГФИ ВНИЦ РАН, 9 пунктов ГЦ РАН и 25 пунктов ППК «Роскадастр» (рис. 4). Кроме этого, при обработке результатов измерений нами будут использоваться данные постоянно действующих станций Геофизической службы РАН и других коммерческих базовых станций.



a)



b)



c)

Рис. 3. Скальные геодезические центры Осетинского геодинамического полигона. а – схема заложенных скальных геодезических центров; б – пункт UNL1; в – пункт CHMI (с крышкой) / Fig. 3. Rock geodesic centers of the Ossetian geodynamic test site. а – scheme of laid rock geodesic centers; б – point UNL1; в – point CHMI (with cover)

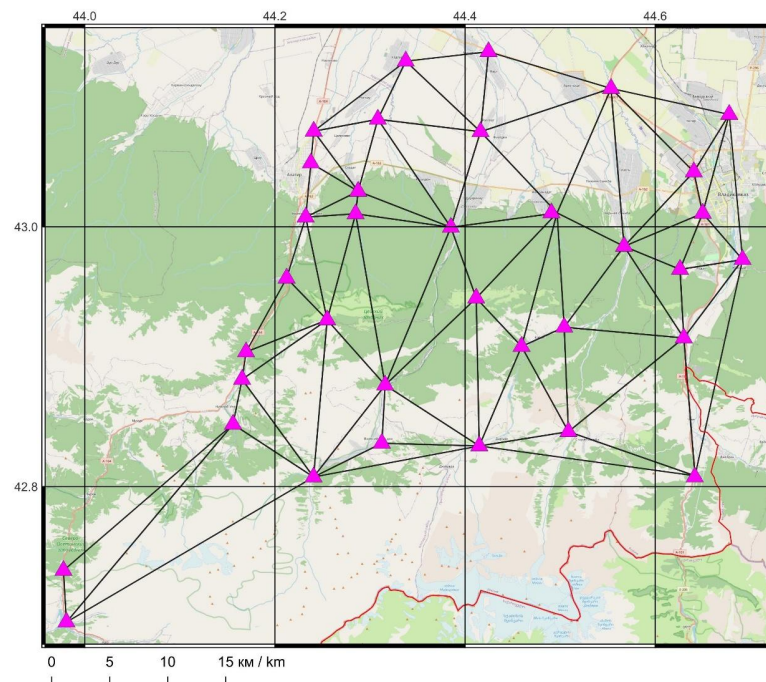


Рис. 4. Сформированная геодезическая сеть для деформационного мониторинга / Fig. 4. Formed geodetic network for deformation monitoring

Результаты исследования

На территории Осетинского геодинимического полигона в пределах сформированной геодезической сети деформационного ГНСС-мониторинга в сентябре 2023 года выполнены работы по проведению первого цикла наблюдений за современными движениями земной коры средствами ГНСС. Схема расстановок ГНСС аппаратуры в 2023 году является исходной, которая должна будет повторяться в следующих эпохах измерений. В качестве опорных пунктов ГНСС-измерений в районе приняты три постоянно действующие станции Геофизической службы РАН (ARD2, VLKZ, LAZ2) и четыре базовые станции ГНСС коммерческой сети АО «ПРИН» (NCHK, NZRN, PRHL, VKAV) (рис. 5). Дополнительно с целью получения приращений координат пунктов в национальной системе координат ГСК-2011 или международной ITRF могут быть использованы результаты наблюдений ближайших станций ФАГС (пункты AST3, PTGK, RSTS) и ближайших станций IGS (ARUC, ZECK) (рис. 6). Для выполнения полевых измерений использовались семь комплектов ГНСС-приемников и антенн, следующих моделей:

- Комплекты ГНСС-приемников PrinCe P5U с антенной choke-ring C220GR – 4 шт.;
- Комплекты ГНСС-приемников Javad Delta 3N с антеннами JAVGRANT-G3T и G5T – 3 шт.

Комплекты ГНСС с антеннами choke-ring преимущественно использовались для грунтовых центров в хороших условиях транспортной доступности и измерений с использованием геодезического штатива. Комплекты ГНСС с антеннами Javad использовались для скальных центров с принудительным центрированием или в условиях необходимого пешего маршрута или сложной транспортной доступности до пункта.

Комплекты данного ГНСС-оборудования обеспечивают двухчастотные измерения с поддержкой навигационных систем NAVSTAR GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO. Заявленная производителем точность при постобработке в режиме статики в плане до 4 мм, по высоте до 6 мм. Применение такого оборудования фактически приближает качество измерений к уровню обсерваторских станций.

В результате спутниковые измерения на пунктах геодезической сети геодинимического полигона были выполнены за 10 дней в период с 20 по 29 сентября. Измерения были проведены на 35 пунктах, включая скальные центры, установленные в 2023 году. Общее время проведения наблюдений на каждом пункте варьировалось от 4 до 12 часов. Все измерения были выполнены с показателем синхронной продолжительности записи (одновременной работы всех приемников) более 4-х часов. Внешний вид некоторых пунктов измерений представлен на рис. 7.

Первичные данные ГНСС-измерений обрабатываются с использованием лицензионной программы MAGNET Office Tools. При обработке результатов измерений принимается маска угла возвышения 15° . Режим постобработки включает использование спутниковых сигналов GPS и ГЛОНАСС, и точных эфемерид. Основное количество СКО положения пунктов в плане группируется в диапазоне 2–3 мм, а по высоте в диапазоне 3–5 мм. Средние значения СКО в плане и по высоте составили 3 мм и 6 мм соответственно.

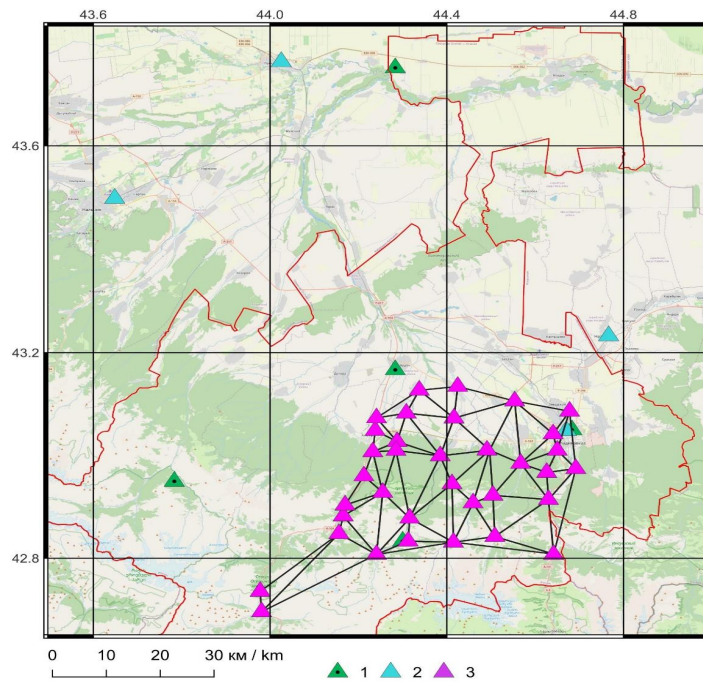


Рис. 5. Схема ГНСС-пунктов, участвующих в измерениях эпохи 2023 года. 1 – пункты Геофизической службы РАН; 2 – пункты АО «ПРИН»; 3 – пункты сформированной сети /
 Fig. 5. Schematic of the GNSS points participating in the 2023 epoch measurements. 1 – points of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences; 2 – points of JSC “PRIN”; 3 – points of the formed network

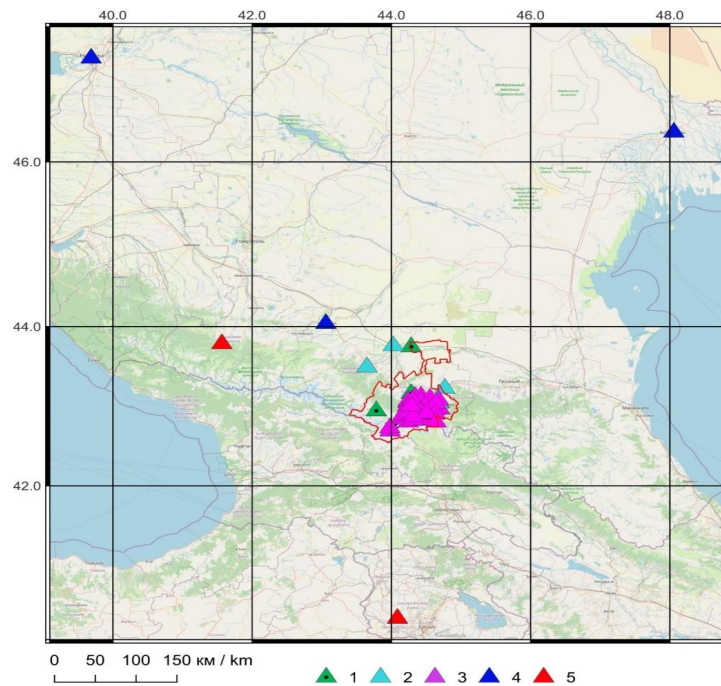


Рис. 6. Положение измеряемых ГНСС-пунктов по отношению к пунктам сетей IGS и ФАГС. 1 – пункты Геофизической службы РАН; 2 – пункты АО «ПРИН»; 3 – пункты сформированной сети; 4 – пункты фундаментальной астрономо-геодезической сети РФ; 5 – пункты международной сети IGS /

Fig. 6. Position of measured GNSS points in relation to IGS and FAGS network points. 1 – points of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences; 2 – points of JSC “PRIN”; 3 – points of the formed network; 4 – points of the fundamental astronomical and geodetic network of the Russian Federation; 5 – points of the international IGS network

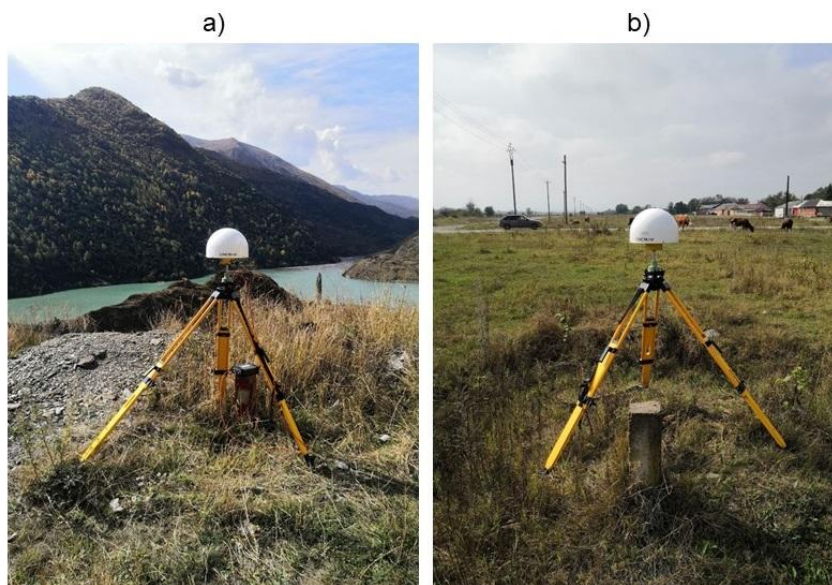


Рис. 7. Внешний вид пунктов во время ГНСС-измерений.
a – пункт «Нижний Зарамаг»; b – пункт «71533» /
Fig. 7. Appearance of points during GNSS measurements.
a – point “Nizhny Zaramag”; b – point “71533”

Выполнение ГНСС-измерений в районе исследований имеет ряд особенностей из-за физико-географических условий территории. Геодезические пункты формируемого геодинимического полигона достаточно широко разнесены по территории республики и находятся в существенно отличающихся друг от друга природных условиях (горных, предгорных, равнинных). Существует несколько факторов, которые могут повлиять на точность определения местоположения ГНСС-антенн. Их условно можно разделить на внешние (многолучевость, тропосферные и ионосферные помехи) и внутренние (конструкция самой антенны). Все эти факторы оказывают влияние на точность ГНСС-измерений в различной степени в пределах Осетинского геодинимического полигона.

В работе [Кафтан и др., 2023] была представлена новая методика полевого контроля точностных параметров комплектов ГНСС-аппаратуры. Для применения этой методики не обязательно иметь эталонных геодезических построений, а достаточно использовать единственную отобранную базовую линию. Полевые измерения в сетях ГНСС осуществляются определенным количеством комплектов измерительной аппаратуры n . При использовании разностного метода это количество не может быть менее 2. В сетях с большим числом пунктов, как правило, используется большее количество комплектов. Измеряя последовательно один и тот же вектор базовой линии всеми образующимися парами комплектов, появляется возможность оценить не только точность измерения самого вектора, например, по отклонениям от среднего значения, но и оценить вклад в общую погрешность каждого из комплектов [Кафтан и др., 2023]. При этом, чем больше комплектов используется в измерениях, тем надежнее полученные оценки.

Однако данные эксперименты проводились только для условий полигонов с неизменными физико-географическими условиями, практически в равнинных условиях. В этом ключе планируется расширение и обоснование применения методики полевого контроля точности для условий горных и предгорных районов. Их осо-

бенность заключается в резком перепаде высот между пунктами, что может особенно сильно повлиять на тропосферные источники помех. Вторым важным аспектом совершенствования методики в рамках проекта – является ее применение к ГНСС-антеннам с конструкцией choke-ring, которые ранее не были исследованы. И третье, то, что в процессе работ изучаются новые антенны китайского производства с оригинальными китайскими платами CNCNAV, которые при действующих обстоятельствах все чаще применяются на территории Российской Федерации (к примеру, в коммерческих базовых сетях ГНСС-станций), что представляет собой определенный практический интерес.

Таким образом, в рамках совершенствования методики полевого контроля измерительной ГНСС-аппаратуры впервые были выполнены экспериментальные исследования ее применения в горном районе (на примере территории Республики Северная Осетия-Алания) и для конструкции ГНСС-антенн типа choke-ring. В 2023 году была отобрана тестовая базовая линия ГНСС, расположенная в наилучших доступных условиях приема спутникового сигнала (рис. 8). Длина линии составила 2095 м. Препятствия прохождению радиоволн от спутника к антенне приемника отсутствовали.



Рис. 8. Схема измерений базовой линии /

Fig. 8. Schematic of baseline measurements

Контролю были подвергнуты 6 ГНСС комплектов аппаратуры, применяемых в полевых кампаниях наблюдений, на Осетинском геодинамическом полигоне. Это ГНСС-антенны с обтекателем Javad GrAnt G3T (модель NGS JAV_GRANT_G3T+G – https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=JAV_GRANT-G3T%2BG_NONE.003), антенны choke-ring CHCC220GR (модель NGS CHCC220GR CHCD – https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=CHCC220GR_CHCD.003), стандартные антенны CHC AT312 (модель NGS CHCAT312 NONE – https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=CHCAT312_NONE.003).

Измерения парами комплектов выполнялись двухчасовыми сеансами, с дискретностью регистрации ГНСС-сигнала – 30 секунд, маска возвышения была установлена на 5°. Расстановка комплектов на контрольной базовой линии представлена в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Расстановка комплектов ГНСС-антенн и приемников для измерений /
Arrangement of GNSS antenna and receiver sets for measurements**

Серия измерений / Series of measurements	Точка от – пункт 71924 / Point from – point 71924	Точка до – пункт 72217 / Point to – point 72217
1	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
2	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
3	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
4	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
5	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
6	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437
7	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437
8	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
9	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
10	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540
11	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540
12	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
13	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
14	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437
15	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994

Обработка наблюдений по разработанному алгоритму позволит сравнить номинальные параметры ГНСС-антенн с их фактическими характеристиками. И соответственно учесть фактические положения фазового центра ГНСС-антенн при обработке результатов ГНСС-измерений. Выявление вариаций фазового центра антенн может отличаться до 25 мм от заявленного производителем, как это показано в работах [Кафтан и др., 2023].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В границах Республики Северная Осетия–Алания сформирована геодезическая сеть для деформационного ГНСС-мониторинга восточной части и отдельно узла сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома. Сформированный геодинимический полигон в настоящее время включает в себя 35 пунктов. В сентябре 2023 г. выполнен первый цикл наблюдений за СДЗК средствами ГНСС.

Выполнены исследования методики оценки точности ГНСС-измерений, связанные с особенностями горных физико-географических условий. Методика полевого контроля точности комплектов ГНСС-аппаратуры, позволяет без эталонных построений проводить в полевых условиях контроль по одиночной базовой линии. Ранее подобные эксперименты проводились для равнинных условий. Важным аспектом является применение методики к новым типам ГНСС-антенн, ранее не исследованных, включая *choke-ring*, а также антенн китайского производства с китайскими платами CNCNAV, которые в настоящий момент все чаще применяются на территории России (к примеру, в коммерческих базовых сетях ГНСС-станций). Первые результаты показали, что основное количество СКО положения пунктов в плане группируется в диапазоне 2–3 мм, а по высоте в диапазоне 3–5 мм. Средние значения СКО в плане и по высоте составили 3 мм и 6 мм соответственно.

В результате проведенных исследований, было показано, что сформированный геодинамический полигон нацелен на выполнение режимных ГНСС-наблюдений в региональном масштабе. Развитие геодезической сети будет способствовать комплексному исследованию малоизученных территорий данного района и получению новых данных о динамике деформирования земной коры Осетинского сектора Большого Кавказа.

Литература

1. Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным. // *Физика Земли*. – 2006. – № 1. – С. 30–44.
2. Белоусов В.В. Большой Кавказ как тектоническая лаборатория. // *Проблемы геодинамики Кавказа*. М.: Наука, 1982. – С. 9–13.
3. Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Маневич А.И., Кафтан А.В. Экспериментальное исследование методики полевой оценки точности измерений ГНСС. // *Геодезия и картография*. – 2023. – № 10. – С. 12–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21.
4. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // *Физика Земли*. – 2019. – № 4. – С. 99–123. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123.
5. Маневич А.И., Шевчук Р. В., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Забродин С.М. Развитие сети ГНСС-наблюдений в пределах Нижне-Канского массива с использованием скальных геодезических центров. // *Сейсмические приборы*. – 2022. – Т. 58. № 4. – С. 111–129. DOI: 10.21455/si2022.4-7.
6. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, – 1968. 483 с.
7. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Хубаев Х.М. Осетинская геодезическая спутниковая сеть: создание и первые результаты геодинамического мониторинга. // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2014. – Т. 14. № 4. – С. 2–11.
8. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Торчинов Х.М.З., Хубаев Х.М. Изучение геодинамики горной Осетии в 2009-2011 гг. // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2011. – Т. 11. № 4. – С. 49–53.
9. Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М., Дробышев В.Н., Кусраев А.Г., Хубаев Х.М. Деформации земной коры в Осетинском регионе большого Кавказа по данным ГНСС-измерений. // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2021. – Т. 20. № 4. – С. 122–137. DOI: 10.21455/GPB2021.4-8.
10. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Рогожин Е.А. Зона Владикавказского активного разлома на территории РСО-А. // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2008. – Т. 8. № 3. – С. 44–56.
11. Певнев А.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. О модернизации геодезических исследований на Владикавказском геодинамическом прогнозном полигоне. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2014. – № 3. – С. 84–90.

12. Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей. М.: Картогеоцентр – Геодезиздат, – 1993. 104 с.
13. Правила закрепления центров пунктов спутниковой геодезической сети. М.: ЦНИИГАиК, 2001. – 30 с.
14. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36–49.
15. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001.
16. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмоструктура южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.
17. Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шур Д.Ю., Арефьев С.С. Строение очаговой зоны Рачинского землетрясения 1991 г. по данным локальной сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды. // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12. № 1. – С. 5–31.
18. Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Е. Современная геодинамика Средиземноморской-Малокавказской части Альпийско-Индонезийского подвижного пояса. // Физика Земли. – 2014. – № 1. – С. 40–58.
19. Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. – 192 с.
20. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. // Earth-Science Reviews. – 2020. – Vol. 207. Issue 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
21. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351.
22. Reilinger R.E., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. – 2006. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
23. 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. Issue 3. pp. 26–30.

References

1. Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Bykova V.V., Dorbat K. Depth structure of the origin zone of the Rachin earthquake from seismic tomographic data. Physics of the Solid Earth. 2006. No. 1. pp. 30–44. (In Russ.)
2. Belousov V.V. The Greater Caucasus as a tectonic laboratory. Problems of geodynamics of the Caucasus. Moscow. Nauka. 1982. pp. 9–13. (In Russ.)
3. Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Shevchuk R.V., Manevich A.I., Kaftan A.V. Experimental study of the field methodology for assessing the accuracy of GNSS measurements. Geodezia i Kartografiya. 2023. No. 10. pp. 12–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21. (In Russ.)
4. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2019. No. 4. pp. 99–123. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123. (In Russ.)
5. Manevich A.I., Shevchyk R.V., Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Zabrodin S.M. Improvement of the network of GNSS monitoring of the Nizhne-Kansky massif using bedrock pin geodetic centre. Seismic Instruments. 2022. Vol. 58. No. 4. p. 111–129. DOI: 10.21455/si2022.4-7. (In Russ.)

6. Milanovsky E.E. Modern Tectonics of the Caucasus. Moscow. Nedra. 1968. 483 p. (In Russ.)
7. Milyukov V.K., Drobyshev V.N., Mironov A.P., Steblou G.M., Khubaev Kh.M. Ossetian geodetic satellite network: creation and first results of geodynamic monitoring. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2014. Vol. 14. No. 4. pp. 2–11. (In Russ.)
8. Milyukov V.K., Drobyshev V.N., Torchinov Kh.M.Z., Khubaev Kh.M. Study of the geodynamics of mountainous Ossetia in 2009-2011. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2011. Vol. 11. No. 4. pp. 49–53. (In Russ.)
9. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblou G.M., Drobyshev V.N., Kusraev A.G., Khubaev Kh.M. Crustal deformations in the Ossetian region of the Greater Caucasus according to GNSS measurements. *Geophysical processes and the biosphere*. 2021. Vol. 20. No. 4. pp. 122–137. DOI: 10.21455/GPB2021.4-8. (In Russ.)
10. Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Novikov S.S., Rogozhin E.A. Zone of the Vladikavkaz active fault on the territory of the RNO-A. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2008. Vol. 8. No. 3. pp. 44–56. (In Russ.)
11. Pevnev A.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. On modernization of geodetic studies at Vladikavkaz geodynamic forecast polygon. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. No. 3. p. 84–90. (In Russ.)
12. Rules for laying centers and benchmarks at points of geodetic and leveling networks. Moscow. Cartgeocenter – Geodesizdat. 1993. 104 p. (In Russ.)
13. Rules for fixing the centers of points of the satellite geodetic network. Moscow. TSNIIGAiK. 2001. 30 p. (In Russ.)
14. Rogozhin E.A., Gorbaticov A.V., Stepanova M.Y., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. Structure and modern geodynamics of the Greater Caucasus megacyclorium in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)
15. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. – Vol. 13. No. 1. pp. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006. (In Russ.)
17. Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Shur D.Yu., Arefiev S.S. Focal zone structure of the Racha earthquake 1991 from data of local seismic tomography with adaptive parameterization of the environment. *Geophysical Research*. 2011. Vol. 12. No. 1. pp. 5–31. (In Russ.)
18. Shevchenko V.I., Lukk A.A., Prilepin M.T., Reilinger R.E. Modern geodynamics of the Mediterranean-Malocaucasian part of the Alpine-Indonesian mobile belt. *Physics of the Solid Earth*. 2014. No. 1. pp. 40–58. (In Russ.)
19. Sholpo V.N., Rogozhin E.A., Goncharov M.A. Folding of the Greater Caucasus. Moscow. Nauka. 1993. 192 p. (In Russ.)
20. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 207. Issue 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
21. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351.
22. Reilinger R.E., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2006. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
23. 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. Issue 3. pp. 26–30.