

УДК 550.34:551.1(082)

DOI: [10.46698/VNC.2022.25.32.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.32.003)

Оригинальная статья

Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга

В.В. Стогний¹, В.Б. Заалишвили¹, Н.Л. Пономарева²

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: stogny_vv@mail.ru;

²Сейсмическая станция «Махачкала» ФИЦ ЕГС РАН, Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ахундова, 136

Статья поступила: 21.04.2022, доработана: 20.05.2022, принята к публикации: 25.05.2022

Резюме: Актуальность работы. Северный Кавказ является одним из наиболее сейсмоопасных регионов России, в пределах которого функционируют сети сейсмического и геодинамического GPS-мониторинга, на основе интерпретации которых ставятся и решаются разнообразные задачи, актуален поиск новых направлений их эффективного использования. **Цель работы** – рассмотрение возможностей комплексного анализа мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности существующей сетью станций и лабораторий Северного Кавказа для оценки состояния геодинамического развития как основы при разработке методики оценки геоэкологических рисков. **Методы исследования.** Методы и методика работы заключались в обзоре и анализе возможностей систем мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности Северного Кавказа и, на этой основе, поиске и обоснованию новых направлений их эффективного комплексного использования. **Результаты работы.** На основе анализа возможностей сейсмического и GPS-мониторинга территории Северного Кавказа сформулированы задачи, направленные на выявление глубинных источников тектонических напряжений и их возможной связи с приповерхностной геодинамикой и сейсмическим режимом, которые могли бы стать основой геоэкологического районирования. При сопоставлении материалов GPS-наблюдений со схемой блокового строения кристаллического фундамента Большого Кавказа, составленной по данным интерпретации гравитационного и магнитного полей, было выявлено, что существует закономерная связь между направлениями векторов скорости перемещения GPS-пунктов в пределах проекций этих блоков. Это позволяет ставить в качестве одной из задач исследований поиск связи глубинной геодинамики на уровне отдельных блоков кристаллического фундамента с условиями, существующими на поверхности. Для проведения таких исследований благоприятным объектом, обеспеченным наиболее плотной сетью станций GPS и сейсмического мониторинга, представляется северо-осетинская часть центрального сектора Большого Кавказа. Поиск связи глубинных геодинамических процессов и неотектонического строения верхних горизонтов разрезов с особенностями распределения векторов скорости пунктов GPS-наблюдений и сейсмическим режимом данной территории может быть выполнен на основе моделей, учитывающих реологические свойства структурно-вещественных комплексов и поля тектонических напряжений данного региона.

Ключевые слова: сейсмичность, GPS-геодинамика, мониторинг, Северный Кавказ, кристаллический фундамент.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ФГБУН Геофизического института ВЦ РАН, код: FMSM-2022-0013.

Для цитирования: Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 34-52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.

DOI: [10.46698/VNC.2022.25.32.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.32.003)

Original paper

Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring

V.V. Stogny¹, V.B. Zaalishvili¹, N.L. Ponomareva²

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: stogny_vv@mail.ru;

Seismic station "Makhachkala" FIC UGC RAS, 136 Akhundova Str., Makhachkala367010, Russian Federation

Received: 21.04.2022, revised: 20.05.2022, accepted: 25.05.2022

Abstract: Relevance. The North Caucasus is one of the most seismically hazardous regions of Russia, within which seismic and geodynamic GPS monitoring networks operate, on the basis of the interpretation of which various tasks are set and solved, and it is important to search for new directions for their effective use. **Aim.** The purpose of the work is to consider the possibilities of a comprehensive analysis of monitoring modern geodynamic processes and seismicity by the existing network of stations and laboratories in the North Caucasus to assess the state of geodynamic development as a basis for developing a methodology for assessing geoecological risks. **Methods.** The methods and methodology of the work consisted in reviewing and analyzing the capabilities of monitoring systems for modern geodynamic processes and seismicity in the North Caucasus and, on this basis, searching for and substantiating new directions for their effective integrated use. **Results:** Based on the analysis of the possibilities of seismic and GPS monitoring of the North Caucasus territory, tasks are formulated aimed at identifying deep sources of tectonic stresses and their possible connection with near-surface geodynamics and seismic regime, which could become the basis of geoecological zoning. When comparing the materials of GPS observations with the scheme of the crystalline basement block structure of the Greater Caucasus, compiled according to the interpretation of the gravitational and magnetic fields, it was revealed that there is a regular relationship between the directions of the movement velocity vectors of GPS points within the projections of these blocks. This makes it possible to set as one of the research tasks the search for a relationship between deep geodynamics at the level of individual blocks of the crystalline basement and the conditions existing on the surface. For such studies, the North-Ossetian part of the central sector of the Greater Caucasus seems to be a favorable object, provided with the densest network of GPS and seismic monitoring stations. The search for a connection between deep geodynamic processes and the neotectonic structure of the upper horizons of the sections with the features of the distribution of velocity vectors of GPS observation points and the seismic regime of a given territory can be performed on the basis of models in which must take into account the rheological properties of structural-material complexes and the tectonic stress field of this region.

Keywords: seismicity, GPS geodynamics, monitoring, North Caucasus, crystalline basement.

Acknowledgment: This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the All-Russian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, code: FMSM-2022-0013.

For citation: Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 34-52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.

Введение

Кавказ как геодинамическая система на стыке Восточноевропейской и Аравийской литосферных плит характеризуется высокой сейсмичностью. Первые систематические сведения об исторических землетрясениях на этой территории были представлены в «Каталоге землетрясений Российской империи» [Мушкетов, Ор-

лов, 1893], изданном Русским географическим обществом в качестве XXVI тома серии «Записки по общей географии». Фрагмент «Карты распространения землетрясений...», как приложения к каталогу, охватывающий Большой Кавказ и прилегающие области, показан на рисунке 1.

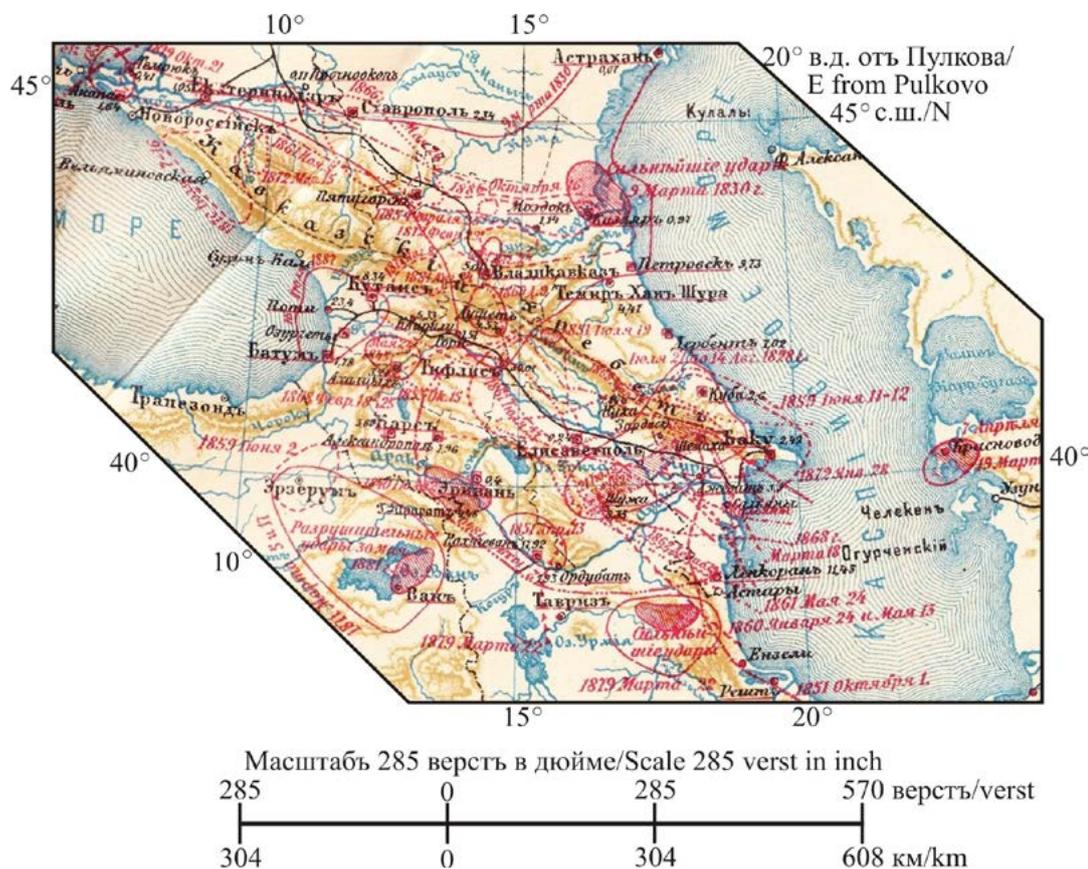


Рис. 1. Фрагмент из «Карта распространения землетрясений въ Россіи съ пограничными областями» по [Мушкетов, Орлов, 1893] (1 верста – 1,0668 км, 1 дюйм – 2,54 см) /

Fig. 1. Fragment from the “Map of the distribution of earthquakes in Russia with border areas” according to [Mushketov, Orlov, 1893] (1 verst – 1.0668 km, 1 inch – 2.54 cm)

Сведения о землетрясениях, представленных в [Мушкетов, Орлов, 1893], были собраны А.П. Орловым по 1880 г., дополнены и обобщены И.В. Мушкетовым по 1890 г. Согласно этим данным, на территории Северного Кавказа и Предкавказья наиболее сильные землетрясения были отмечены в следующих районах (в скобках указан год): регион Кавказских Минеральных Вод и, наиболее часто, в районе Пятигорска (1772, первое упоминание; 1784; 1821; 1839; 1844; 1872; 1874); в пределах Северной Осетии, в районах Садонского ущелья (1854) и Владикавказа (1873); в пределах Дагестана, в районах Моздока (1785), Петровска (1863), Дербента (1847), и, наиболее разрушительное, Кизляра (Дагестанское II, 1830). Несмотря на появившиеся различные каталоги, содержащие сведения об исторических и инструментальных землетрясениях (по данным Т.Б. Яновской [2014], история отечественной инструментальной сейсмологии начинается на рубеже 19-го и 20-го веков) Кавказа, примером которого может служить каталог А.А. Годзиковской (приведены сведения о исторических и инструментальных землетрясениях с $M \geq 4$ ($K \geq 11$) этого региона) каталог [Мушкетов, Орлов, 1893] представляет собой ценный источник

первичной информации о землетрясениях этого региона. Данные по сейсмичности Северного Кавказа обобщались в [Ананьин, 1977; Ulomov et al., 2007]. Эпицентры наиболее сильных исторических и инструментальных землетрясений по [Tibaldi et al., 2020] вынесены на карту рельефа Большого Кавказа (рис. 2).

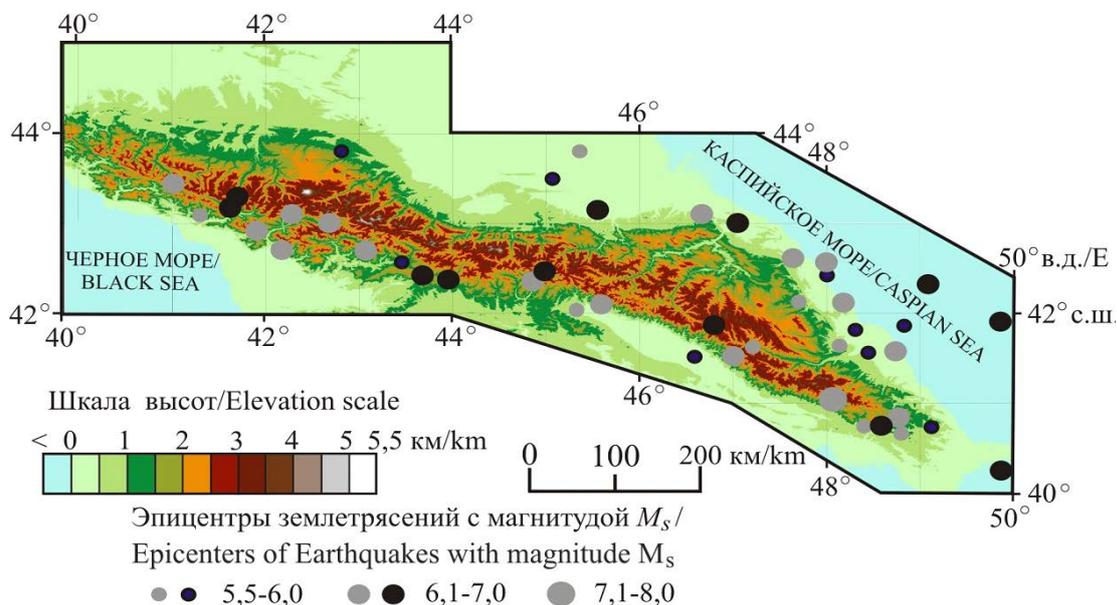


Рис. 2. Эпицентры наибольших исторических (до 1900 г., серые) и инструментальных (после 1900 г., черные) землетрясений по [Tibaldi et al., 2020] на карте рельефа Большого Кавказа /

Fig. 2. Epicenters of the largest historical (before 1900, gray) and instrumental (after 1900, black) earthquakes according to [Tibaldi et al., 2020] on the relief map of the Greater Caucasus

История инструментальных сейсмических наблюдений на Северном Кавказе изложена в [Габсатарова и др., 2008], где выделены и описаны семь периодов наблюдений, инструментальное и методологическое обеспечение которых находило отражение в региональных каталогах в значениях представительных магнитуд и наклона графика повторяемости регистрируемых землетрясений. Отмечено, что за вековой период сейсмических наблюдений уровень представительных магнитуд M на большей части территории Северного Кавказа доведен с 5 до 2. В 2015 г. сейсмический мониторинг Северного Кавказа и прилегающих территорий осуществлялся на 59 сейсмостанциях сети ФИЦ ЕГС РАН. Все сейсмостанции были оснащены цифровым оборудованием, подключены к сети Интернет и передавали информацию в центры обработки в режиме, близком к реальному времени, эпицентры наиболее значимых землетрясений.

Современная геодинамика Кавказа наиболее отчетливо проявляется в материалах GPS-наблюдений, что показано в материалах [Лукк, Шевченко, 2019]. В этой работе проанализированы данные сейсмических наблюдений по примерно 230 пунктам, расположенным на территории Северного Кавказа (Дагестан, Северная Осетия, Ставропольский и Краснодарский края) и сопредельных государств (Азербайджан, Армения, Грузия и частично Турция) с результатами GPS-наблюдений.

Целью настоящей работы является анализ возможностей мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности существующей сетью станций и лабораторий Северного Кавказа и выработка рекомендаций по возможности их использования для комплексной интерпретации при решении специальных задач.

Материалы и методы исследований

Методы и методика работы заключались в обзоре и анализе систем мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности Северного Кавказа и, на этой основе, поиске и обоснованию новых направлений их эффективного использования.

Одной из эффективных методик и технологий изучения современных геодинамических процессов является мониторинг движения литосферных плит и отдельных блоков земной коры по данным GPS-наблюдений, широко применяющийся начиная с 90-х гг. XX века в различных регионах Мира [Gahalaut et al., 2017; Reilinger et al., 2006; Thatcher, 2003]. Особенно эффективно применение этих технологий при изучении коллизионных зон Земли, одной из которых согласно В.Г. Трифонову [Trifonov, 2016] является Аравийско-Кавказский сегмент Альпийско-Гималайского орогенического пояса, северным флангом которого является Большой Кавказ. Согласно данным GPS-измерений [McClusky et al., 2000], Кавказский сегмент имеет тенденцию движения в северо-восточном направлении, преимущественно ортогональном простиранию основных структур Большого Кавказа со скоростью 10 мм/год. Расположенный западнее Анатолийский блок движется в юго-западном направлении со скоростью 25 мм/год, а расположенный восточнее Иранский блок – в юго-восточном направлении со скоростью 10 мм/год, что обусловлено движением в северо-северо-западном направлении Аравийской плиты со скоростью 18 мм/год (в Евразийской системе координат ITRF).

Сеть GPS-станций на Северном Кавказе начала организовываться в 1990-х гг. [Milyukov et al., 2015]. Станция GPS «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесия) была создана на территории Зеленчукской радиоастрономической обсерватории Института прикладной астрономии (ИПА) РАН, расположенной на высоте 1166 м над уровнем моря. В 1997 г. она включена в сеть опорных станций международной службы IGS (International GNSS Service) с кодом ZECK и в реализацию международной земной системы отсчета ITRF2008 (International Terrestrial Reference System). В 2005–2008 гг. ГАИШ МГУ создал три новых постоянных станции GPS/ГЛОНАСС наблюдений, в их числе: «Терскол» (TRSK), расположенную в Приэльбрусье (Кабардино-Балкария) на территории Терскольской международной обсерватории на высоте 3100 м; «Кисловодск» (KISL) на территории Горной солнечной станции Пулковской обсерватории РАН на горе Шатджатмаз (Карачаево-Черкесия) на высоте 694 м; «Владикавказ» (VLKK), организованную совместно с ВНИЦ РАН и Геофизическим институтом ВНИЦ РАН, на крыше здания которого была установлена антенна этой станции (высота над уровнем моря 696 м). Первые две станции, «Терскол» (TRSK) и «Кисловодск» (KISL), были оснащены антеннами Topcon CR-G3 Choke Ring и приемниками JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLONASS, а третья станция, «Владикавказ» (VLKK), была оснащена антенной Javad MarAnt+ и приемником JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLONASS. С 2010 г. на Северном Кавказе развивается сеть станций GPS/GLONASS Геофизическая служба (ГС) РАН (4 станции). Точность определения координат станций GPS/ГЛОНАСС по данным обработки наблюдений оценивается в пределах 1–3 мм за сутки, что соответствует точности определения координат опорных станций сети IGS.

На схему рисунка 3 вынесены пункты GPS-наблюдений и результаты измерений за 1991–1997 гг. из работы [Лукк, Шевченко, 2019]. Оценка скоростей и на-

правлений движений пунктов GPS-наблюдений была выполнена в местной системе координат относительно опорной геодезической станции «Зеленчук» (ZELB), которая расположена в пределах относительно стабильной Лабино-Малкинской зоны. Пункты GPS NINO и NICH, расположенные на территории Грузии, имеют векторы скоростей субмеридионального направления, ортогонального к простиранию основных структур Большого Кавказа, а векторы скоростей пунктов GPS, расположенных в пределах Северного Кавказа, разнонаправлены относительно структур кристаллического фундамента. Так, вектор скорости пункта GPS DUBK, расположенного в контурах Терского блока кристаллического фундамента, имеет юго-восточное направление, а рядом расположенного пункта ZURA, попадающего, вероятно, в зону влияния внутриблокового разлома – запад-северо-западное, близкое к направлению простирания этого разлома. В пределах Центрального сектора Большого Кавказа, вектор скорости пункта GPS KRES (модуль вектора 3,53 мм/год относительно станции ZELB), расположенного в контурах Верхнетерского блока кристаллического фундамента, имеет северо-западное направление, а пунктов GPS BEUG, SHAT, ULKA, BALK, MATS, расположенных в контурах Эльбрусского блока – преимущественно юго-западное. Отметим, что гипоцентры землетрясений в пределах Северного Кавказа локализуются обычно в консолидированной земной коре либо в верхней мантии.

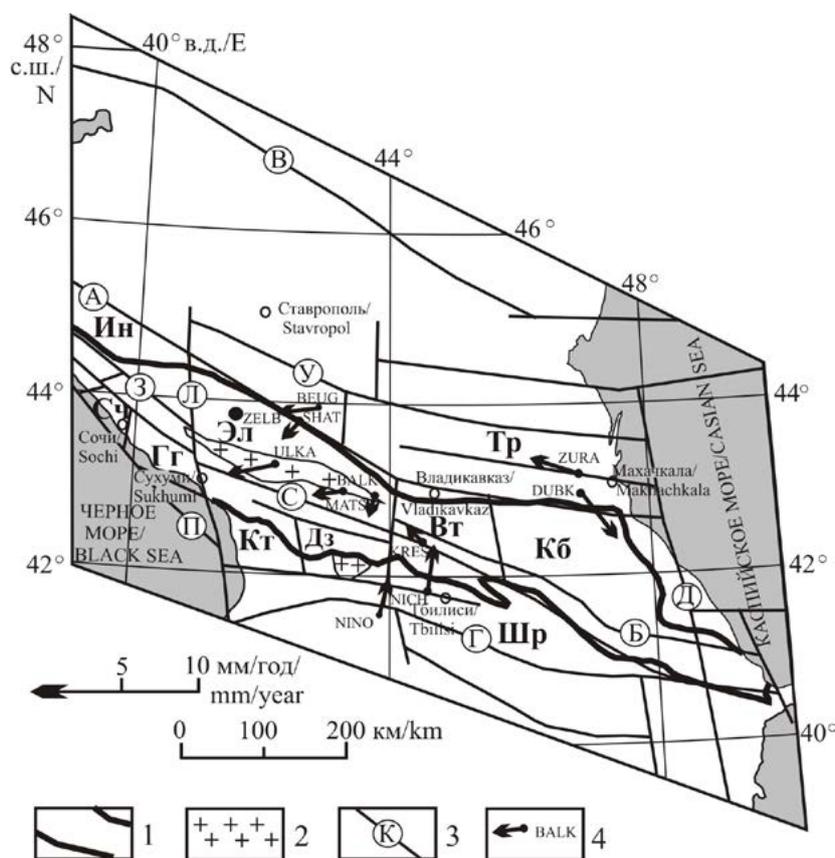


Рис. 3. Пункты GPS-наблюдений и направлений современных тектонических движений Северного Кавказа по [Лукк, Шевченко, 2019] на схеме тектонического строения кристаллического фундамента Большого Кавказа и прилегающих областей по [Стогний, Стогний, 2017], с упрощением: 1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа по

[Геологическая..., 1978]; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзирульского массива; 3 – межблоковые разломы: А – Азово-Каспийский, В – Северо-Скифский, Г – Аджаро-Мингечаурский, Д – Дербент-Ленкоранский, З – Западно-Кавказский, Л – Лаба-Батумский, У – Уруп-Терский; П – Причерноморский, С – Сването-Алазанский, Б – Бежитинский. 4 – векторы скоростей горизонтальных смещений геодезических станций GPS по данным измерений за 1991–1997 гг. [Shevchenko et al., 1999] относительно опорной геодезической станции ZELB и их кодовые названия. Блоки: Сч – Сочинский, Гг – Гагринский, Дз – Дзирульский, Вт – Верхнетерский, Ин – Индолокубанский, Кб – Кубачинский, Тр – Терский, Кт – Кутаисский, Шр – Ширакский, Эл – Эльбрусский /

Fig. 3. GPS observation points and directions of modern tectonic movements of the North Caucasus according to [Lukk, Shevchenko, 2019] on the scheme of the tectonic structure of the Greater Caucasus crystalline basement and adjacent areas according to [Stogny, Stogny, 2017], with simplification: 1 – outline of the Greater Caucasus megaanticlinorium after [Geological..., 1978]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment and the Dzirul massif;

3 – interblock faults: А – Azov-Caspian, В – North Scythian, Д – Adzhar-Mingachevir, Д – Dербent-Lenkoran, Н – West Caucasian, Л – Laba-Batum, У – Urup-Tersky; Р – Black Sea, S – Svaneto-Alazansky, В – Bezhitinsky; 4 – velocity vectors of horizontal displacements of GPS geodetic stations according to measurement data for 1991–1997 [Shevchenko et al., 1999] relative to the reference geodetic station ZELB and their code names. Blocks: Sch – Sochinsky, Gg – Gagrynsky, Dz – Dzirullsky, Vt – Verkhnetersky, In – Indolokubansky, Kb – Kubachinsky, Tr – Tersky, Kt – Kutaisky, Shr – Shiraksky, El – Elbrusky

Данные о землетрясениях с магнитудой $m_b \geq 3$ исследуемого региона содержатся в каталоге Международного сейсмологического центра (ISC bulletin). Сведения о землетрясениях для каталога ISC дают национальные сети сейсмических станций, примером которых может служить сеть сейсмических станций Индии [Srijayanthi et al., 2020], содержащая 115 сейсмических станций Национального центра сейсмологии (NCS). Сейсмический мониторинг для сильных землетрясений Индии (с магнитудой $M > 6,0$) дополнялся исследованиями, связанными с динамикой очага землетрясения и параметрами разрыва по наблюдениям за смещением на участках близко расположенных GPS-пунктов.

Согласно В.И. Бурмину [Burmin, 2018], эффективность современной Кавказской сети сейсмологических наблюдений (всего 258 станций) оценивается следующим образом: в центре сети ошибка в определении координат эпицентров землетрясений по широте и долготе не превышает 0,4 км, глубин очагов – 1,0 км, а на периферии сети на всей территории Кавказа соответственно 1,0 км для координат эпицентра и 10 км при определении глубин очага землетрясения. Сеть сейсмических станций Северного Кавказа ФИЦ ЕГС РАН в настоящее время содержит около 70 сейсмостанций, в их числе: Дагестанского филиала – 7, Северо-Осетинского – 17, Кавминводской группы – 18. В районе Большого Сочи по [Маловичко, Габсатарова, 2012] магнитудная представительность сети сейсмических станций составляет не менее 1 балла. По результатам изучения ночных и дневных уровней микросейсмического шума в различные времена года на сейсмических станциях западной зоны Северного Кавказа [Маловичко и др., 2020], на картах представительных значений K_{Pmin} выделяются две области наибольшей чувствительности сети: Анапская, с уровнем $K_{Pmin} = 6,0$ днем и $K_{Pmin} = 5,5$ ночью, и Сочинско-Краснополянская, с уровнем $K_{Pmin} = 5,5$ днем и $K_{Pmin} = 5,0-5,5$ ночью.

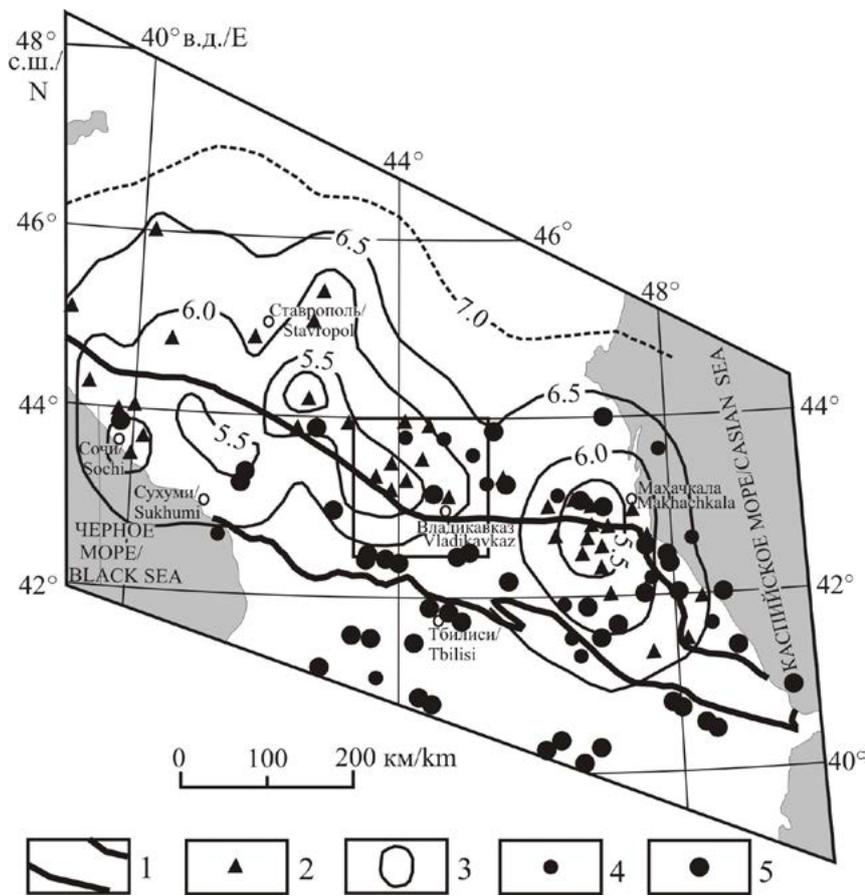


Рис. 4. Схема расположения сейсмических станций Северного Кавказа и возможности локализации сейсмических событий как минимум тремя станциями в единицах K_{pmin} по [Габсатарова и др., 2021] с эпицентрами землетрясений (исторических и инструментальных) магнитудой $M \geq 5,5$ по (электронный ресурс: Каталог землетрясений Кавказа / А.А. Годзиковская // <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/catrudat.html>), дополненные по «Каталог землетрясений ISC» за 2015–2021 гг.: 1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая..., 1978]; 2 – сейсмические станции; 3 – изолинии возможности локализации сейсмических событий как минимум тремя станциями в единицах K_{pmin} ; 4, 5 – эпицентры землетрясений с магнитудой: 4 – $M = 5,5-6,0$, 5 – $M > 6,0$. Прямоугольник – контур рис. 5 /

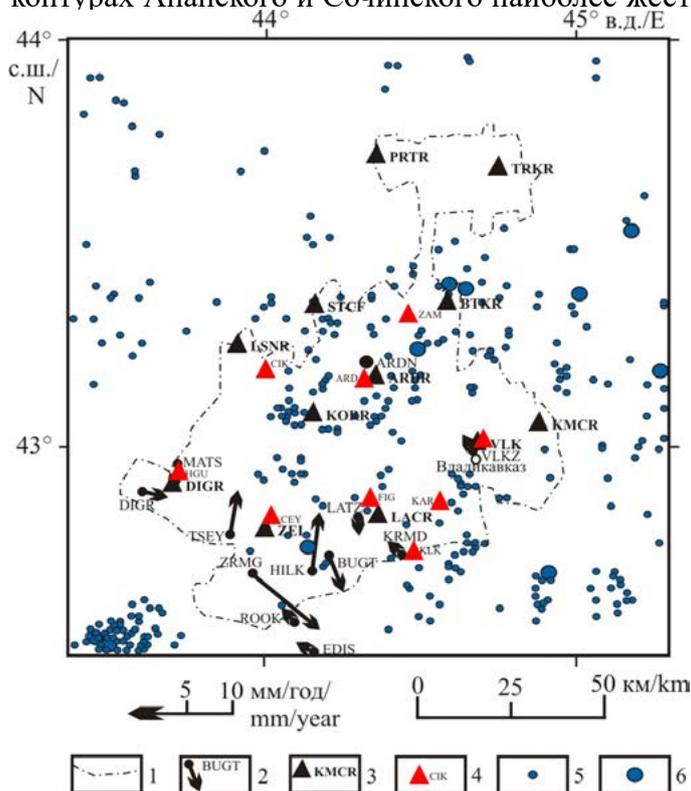
Fig. 4. Scheme of the location of seismic stations in the North Caucasus and the possibility of locating seismic events by at least three stations in units of K_{pmin} according to [Gabsatarova et al., 2021] with epicenters of earthquakes (historical and instrumental) with a magnitude $M \geq 5.5$ according to (Web resource: Catalog of earthquakes of Caucasus/ A.A. Godzikovskaya // <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/catrudat.html>), supplemented according to the “Catalog of earthquakes ISC” for 2015–2021: 1 – outline of the Greater Caucasus megaanticlinorium after [Geologicheskaya..., 1978]; 2 – seismic stations; 3 – isolines of the possibility of locating seismic events by at least three stations in units of K_{pmin} ; 4, 5 – epicenters of earthquakes with magnitude: 4 – $M = 5.5-6.0$, 5 – $M > 6.0$. Rectangle – the contour of the fig. 5

Основные сейсмостанции Северного Кавказа сети ФИЦ ЕГС РАН, а также возможности локализации сейсмических событий как минимум тремя станциями в единицах K_{pmin} по состоянию на 2015 г. [Габсатарова и др., 2021] вынесены на схему рис. 4. Согласно этим данным, возможность локализации сейсмических событий с $K_{pmin} \leq 5,5$ одновременно тремя станциями достигается в восточной части Большого Кавказа (Дагестан), в центральном секторе Большого Кавказа и Предкавказья, и в восточной части Северо-Западного Кавказа.

Результаты исследований и их обсуждение

За последние десятилетия в пределах Большого Кавказа и близлежащих территорий получен довольно представительный материал по современным геодинамическим процессам [Leonov et al., 2001; Рогожин и др., 2019; McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Tan, Taymaz, 2006; Tibaldi et al., 2018, 2020]. Данные систематических GPS-наблюдений на Северном Кавказе наиболее полно обобщены в работах [Лукк, Шевченко, 2019; Milyukov et al., 2015; Shevchenko et al., 1999; Milyukov et al., 2014; Prilepin et al., 1997].

Из наиболее общих закономерностей, отмеченных в [Milyukov et al., 2015] по данным наблюдений на Северо-Кавказской геодинамической сети (СКГС), является смещение структур Северного Кавказа в северо-восточном направлении со скоростью 26–28 мм/год в системе отсчета ITRF2008, при общем сжатии региона со скоростью 1–2 мм/год относительно неподвижной Евразии. При сопоставлении направлений векторов скорости движений пунктов GPS-наблюдений Северного Кавказа относительно опорной геодезической станции «Зеленчук» (ZELB) по данным [Лукк, Шевченко, 2019] со схемой блокового строения кристаллического фундамента этого региона выше было отмечено, что пункты GPS-наблюдений с векторами, значительно различающимися по направлениям, обычно располагаются в пределах разных блоков кристаллического фундамента. Это подтверждает сделанные нами ранее выводы по Северо-Западному Кавказу [Стогний, Стогний, 2019] при сопоставлении результатов GPS-наблюдений по десяти пунктам системы СГП АО «Южморгеология» [Бабешко и др., 2016; Величко и др., 2016] со схемой блокового строения кристаллического фундамента. По этим данным вся система GPS-пунктов имеет общий устойчивый тренд скорости в направлении северо-восток относительно станции «Зеленчукская» (ZECK). Наибольшие скорости зарегистрированы на станциях «Анапа» ($5,15 \pm 0,3$ мм/год) и «Сочи» ($3,73 \pm 0,1$ мм/год), расположенных в контурах Анапского и Сочинского наиболее жестких и высокоплотных сейсмогенных блоков консолидированной коры, контролирующих одноименные сейсмические районы. При этом, вектор скорости станции «Анапа» (азимут $+9,61^\circ$) примерно ортогонален Западнокавказскому межплитному разлому, отражая тенденцию «вдавливания» Анапского блока в фундамент Скифской плиты, а вектор скорости станции «Сочи» (азимут $-16,20^\circ$) субпараллелен Западнокавказскому разлому.



ных блоков консолидированной коры, контролирующих одноименные сейсмические районы. При этом, вектор скорости станции «Анапа» (азимут $+9,61^\circ$) примерно ортогонален Западнокавказскому межплитному разлому, отражая тенденцию «вдавливания» Анапского блока в фундамент Скифской плиты, а вектор скорости станции «Сочи» (азимут $-16,20^\circ$) субпараллелен Западнокавказскому разлому.

Рис. 5. Сейсмические станции СОФ ФИЦ ЕГС РАН по [Саятина и др., 2019], сейсмические станции ГФИ ВНЦ РАН [Заалишвили и др., 2011а], эпицентры землетрясений по данным наблюдений за период с 1 января по 31 октября 2021 г. (фонды ФИЦ

ЕГС РАН) и пункты GPS-наблюдений и направлений современных тектонических движений по измерениям 2010–2013 гг. [Лукк, Шевченко, 2019] PCO-A и сопредельных территорий: 1 – граница PCO-A; 2 – векторы скоростей горизонтальных смещений геодезических станций GPS и их кодовые названия относительно опорной геодезической станции ARDN (пункты GPS VLKZ, LATZ по данным [Milyukov et al., 2015]); 3 – сейсмические станции и их кодовые названия; 4, 5 – эпицентры землетрясений с магнитудой: 4 – $M \leq 2,5$, 5 – $M > 2,5$ /

Fig. 5. Seismic stations of the Siberian Branch of the FRC EGS RAS according to [Sayapina et al., 2019], seismic stations of the Geophysical institute of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences earthquake epicenters according to observational data for the period from January 1 to October 31, 2021 (FRC EGS RAS funds) and GPS observation points and directions of modern tectonic movements according to measurements 2010–2013 [Lukk, Shevchenko, 2019] RNO-A and adjacent territories: 1 - RNO-A boundary; 2 - velocity vectors of horizontal displacements of GPS geodetic stations and their code names relative to the reference geodetic station ARDN (GPS VLKZ, LATZ points according to [Milyukov et al., 2015]); 3 - seismic stations and their code names; 4, 5 - earthquake epicenters with magnitude: 4 – $M \leq 2.5$, 5 – $M > 2.5$

На схему рисунка 5 расположения сейсмических станций СОФ ФИЦ ЕГС РАН и ГФИ ВНИЦ РАН вынесены пункты GPS-наблюдений и их векторы скоростей в местной системе координат относительно станции Ардон (ARDN). Векторы скоростей пунктов GPS-наблюдений EDIS и ROOK (скорости соответственно 3,94 и 0,93 мм/год), расположенные на южном склоне центрального сектора Большого Кавказа, имеют северо-западное направление. Такое же северо-западное направление при небольшой скорости имеют пункты GPS-наблюдений VLKZ и KRMD, а пункт LATZ, расположенный северо-западнее от последнего, имеет южное направление вектора скорости (0,43 мм/год). Векторы скоростей пунктов GPS-наблюдений ZRMG (8,97 мм/год) и BUGT имеют юго-восточное направление, пунктов HILK и TSEY – север-северо-восточное, пункта MATS – юг-юго-западное, а пункта DIGR (2,42 мм/год) – восток-юго-восточное. По данным интерпретации результатов GPS-наблюдений в местной локальной системе координат [Лукк, Шевченко, 2019], в центральном секторе Большого Кавказа и, в частности, на территории PCO-Алания происходит увеличение ширины складчато-надвигового сооружения при одновременном существовании напряжений субгоризонтального сжатия, ориентированного вкрест простирания сооружения, что связывается с увеличением объема слоистых толщ складчато-надвигового сооружения.

Отмеченные нами некоторые связи направлений векторов перемещения GPS-пунктов с проекциями блоков кристаллического фундамента, в пределах которых они расположены, позволяют сформулировать в качестве одной из важных задач поиск связи глубинной тектоники и геодинамики с современными локальными движениями. Такая задача, по-видимому, может быть решена при постановке и проведении специализированных исследований, при которых расположение временных GPS-пунктов при повышенной плотности их сети увязывалось бы с особенностями глубинной структуры и покровно-поверхностных комплексов определенных ключевых участков Северного Кавказа.

По опыту исследований в Крымско-Черноморском регионе [Пустовитенко и др., 2014], результаты многолетнего сейсмического и геодинамического мониторинга могут служить для комплексного анализа текущей сейсмической обстановки и прогноза ее развития, а также для поиска различных предвестниковых явлений и оценки их эффективности для прогноза сильных землетрясений. В этом плане перспективной является осетинская часть центрального сектора Большого Кавказа,

где ГАИШ МГУ совместно с рядом организаций РАН создали спутниково-геодезическую сеть, состоящую из 27 пунктов для проведения периодически повторных GPS-измерений и станцию непрерывных GPS-наблюдений [Рогожин и др., 2019].

На Северном Кавказе одним из наиболее сейсмоопасных для населения является столица Северной Осетии – г. Владикавказ [Zaalishvili, Rogozhin, 2011; Заалишвили и др., 2011a]. Это обусловлено тем, что южная граница города находится всего лишь в нескольких километрах от Владикавказского сейсмогенного разлома. Хотя инструментальными наблюдениями в этом разломе зарегистрированы землетрясения с магнитудами до пяти, однако в действительности его потенциальные возможности гораздо больше. Согласно выполненным в детальном сеймотектоническом исследовании с применением тренчинг метода установлено, что этот разлом породил в прошлом землетрясения с магнитудами около семи [Рогожин и др., 2011; Zaalishvili, Rogozhin, 2011]. А так как разлом и в настоящее время является сейсмоактивным, то и теперь велика вероятность порождения им сейсмических катастроф.

С учетом изложенных обстоятельств: расположение г. Владикавказа в опасной близости от сейсмогенного разлома и возможное появление в этом разломе зоны сейсмического затишья, явились основанием для создания Владикавказского прогнозного геодинамического полигона. Основными элементами подобных систем являются деформационно-геодезические прогнозные профили, ортогонально пересекающие сейсмогенный разлом [Певнев, 2003, 2020; Pevnev, 2021].

Геодезическая деформационная сеть профиля «Терек» Владикавказского прогнозного полигона представлена на рисунке 6 [Заалишвили и др., 2011б; Певнев, Заалишвили, 2014; Певнев и др., 2014].



В качестве основы деформационной сети основного ряда взяты девять уже существующих пунктов GPS (включая и постоянно действующий пункт во Владикавказе), расположенные вдоль шоссеной дороги. Все они являются пунктами сгущения на трассе уже существующих пунктов.

Рис. 6. Векторы скоростей горизонтальных движений пунктов Владикавказского геодинамического прогнозного полигона в системе ITRF2008 /

Fig. 6. Velocity vectors of horizontal movements of the points of the Vladikavkaz geodynamic forecast polygon in the ITRF2008 system

Такое сгущение пунктов необходимо по следующим соображениям. При подготовке оча-

га землетрясения максимальные упругие смещения испытывают участки земной поверхности, примыкающие к сейсмогенному разлому и поэтому с целью более достоверного определения вида и величины упругого деформирования на этих участках расстояния между геодезическими пунктами должны быть сравнительно небольшими. Так как ширина зоны максимальных упругих смещений (в обе стороны от разлома) составляет примерно 10–15 км, то с целью уверенного определения вида и параметров сейсмогенной упругой кривой можно считать достаточным располагать геодезические пункты примерно через 1 км на первых 5–7 км в обе стороны от разлома. Можно полагать, что данные о смещениях примерно 12 пунктов позволят установить действительный вид сейсмогенной кривой (деформация упругого изгиба).

На рис. 6 представлены результаты измерений за период 2014–2016 гг. в системе ITRF2008 [Заалишвили и др., 2016; Заалишвили и др., 2018]. Скорости и направления горизонтальных движений не изменяются при пересечении зоны разлома. Аналогичные результаты получены за период 2015–2016 гг. в работе [Рогожин, Милуков, 2016]. В соответствии с северо-восточной ориентировкой направления смещений пунктов и близширотным простираем дизъюнктивной зоны следует предполагать наличие левосторонних сдвиговых подвижек по ветвям активного разлома. Однако свидетельств активизации движений в зоне разлома в указанный период не наблюдалось. Несомненно, что только подобные плотные системы геодезического мониторинга могут ответить на вопрос готовится или нет в конкретном разломе очаг землетрясения [Певнев, 2003, 2020]. При этом прогноз, несомненно, должен подкрепляться данными сейсмического мониторинга.

На территории РСО-Алания развернута сеть из 12 цифровых сейсмических станций североосетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Саяпина и др., 2019], две из которых (VLK и DIGR) широкополосные, а остальные короткопериодные. На сейсмических станциях «Владикавказ» (VLK), «Лац» (LACR), «Ардон» (ARDR) и «Притеречная» (PRTR) установлена аппаратура непрерывных GPS-наблюдений горизонтальных перемещений.

Республиканская сейсмическая сеть наблюдений Геофизического института ВНИЦ РАН содержит 9 станций (рис. 5), а также 6 сейсмических станций, расположенных на территории г. Владикавказ в районах, отличающихся инженерно-геологическими условиями. Эта сеть в 2003 г. была преобразована в сеть комплексных наблюдений «Кармадонский параметрический полигон» с организацией системы сейсмических, геодинамических и гравиметрических наблюдений. В 2006 г. сейсмическая сеть института была модернизирована с заменой устаревших к этому времени цифровых регистраторов сейсмических сигналов (РСС) «Альфа-Геон» на более современные РСС «Дельта-Геон» [Заалишвили и др., 2017].

Учитывая довольно высокую плотность сейсмической и геодинамической сетей, осетинскую часть центрального сегмента Большого Кавказа можно считать приоритетным объектом исследований, на котором могут решаться задачи поиска связей геодинамических особенностей и сейсмического режима. Одним из основных проблемных вопросов при этом является поиск связи глубинных геодинамических процессов на уровне отдельных блоков кристаллического фундамента и неотектонического строения верхних горизонтов разрезов с особенностями распределения векторов скорости пунктов GPS-измерений и сейсмическим режимом данной территории на основе моделей, учитывающих реологические свойства структур-

но-вещественных комплексов и поля тектонических напряжений данного региона. При решении этой задачи необходимо максимально учитывать опыт структурно-тектонических и неотектонических исследований центрального сектора Большого Кавказа и прилегающих территорий [Leonov et al., 2001; Rogozhin et al., 2015; Свалова, 2021; Сим, Гордеев, 2022]. Важным является также вопрос поиска связи опасных геологических процессов высокогорных территорий, в их числе селей и оползней, с сейсмическим режимом, геодинамическими и реологическими особенностями разрезом и их прогноза на основе инструментальных измерений [Заалишвили и др., 2017; Чотчаев и др., 2020].

Выводы

Предварительные данные по сопоставлению векторов скорости перемещения GPS-пунктов со схемой блокового строения кристаллического фундамента Большого Кавказа и сопредельных территорий показывают, что в пределах проекций этих блоков направления векторов скорости довольно выдержаны. Это позволяет в качестве актуальной сформулировать задачу поиска взаимосвязи между глубинными источниками тектонических напряжений и их возможной связи с приповерхностной геодинамикой и сейсмическим режимом, которые могли бы стать основой геоэкологического районирования. Данная задача должна решаться на основе специализированных исследований, основанных на мониторинге современных геодинамических процессов и сейсмичности. В качестве объекта исследования может служить северо-осетинская часть центрального сектора Большого Кавказа, обеспеченная наиболее плотной сетью станций GPS и сейсмического мониторинга.

Литература

1. Ананьин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1977. – 148 с.
2. Бабешко В.А., Юбко В.М., Глазырин Е.А., Шестопалов В.Л. Характер движений поверхности земной коры по данным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации. // Наука юга России (Вестник Южного Научного Центра). – 2016. – Т. 12. №4. – С. 33–40.
3. Величко С.В., Глазырин Е.А., Шереметьев В.М., Шестопалов В.Л. Мониторинг геодинамической активности Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны по данным GPS-наблюдений. // Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи. Сб. науч. трудов. / Под ред. Т.В. Любимовой, Н.А. Бондаренко, Е.А. Волошко. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2016. – С. 41–47.
4. Габсатарова И.П., Маловичко А.А., Старовойт О.Е. История инструментальных сейсмических наблюдений на Северном Кавказе (очерк). // Геофизический журнал. – 2008. – Т. 30. №5. – С. 50–72.
5. Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Иванова Л.Е., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилов З.М., Асманов О.А. Сейсмичность Северного Кавказа в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 69–83.
6. Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000. / Гл. редактор Д.В. Наливкин. – М.: НПО «Аэрогеология». 1978.
7. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт. // Геология и геофизика Юга России. – 2011а. – №1. – С. 48–59.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Кануков А.С. Развитие сетей GPS/ГЛОНАСС наблюдений на территории Республики Северная Осетия-Алания. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 10-летию со дня основания КНИИ

РАН «Наука и образование в Чеченской республике: состояние и перспективы развития», 7 апреля 2011 г., КНИИ РАН. – 2011б. – С. 325–327.

9. Заалишвили В.Б., Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Мельков Д.А. Вопросы практической реализации геодезического мониторинга на примере Владикавказского геодинамического прогнозного полигона. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №3. – С. 58–64.

10. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Кануков А.С. Инструментальный анализ опасных природно-техногенных процессов на территории Северной Осетии. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том VII. Часть 2. / Под ред. И.А. Керимова. – М.: ИИЕТ РАН, 2017. – С. 89–100.

11. Заалишвили В.Б., Певнев А.К., Кануков А.С. Геодезический прогнозный мониторинг на территории Республики Северная Осетия-Алания. // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2018. – №4(75). – С. 7–11.

12. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – №4. – С. 99–123.

13. Маловичко А.А., Габсатарова И.П. Сейсмическая опасность и сейсмический мониторинг Причерноморья Российской Федерации. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). – 2012. – №1. – С. 98–105.

14. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Дягилев Р.А., Мехрюшев Д.Ю., Зверева А.С. Оценка регистрационных возможностей сейсмической сети в западной части Северного Кавказа через геометрию сети и локальный уровень микросейсмических шумов. // Сейсмические приборы. – 2020. – Т. 56. №3. – С. 35–60. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-3>

15. Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи: Записки русского географического общества по общей географии. Том XXXVI. / Под редакцией И.В. Мушкетова. – СПб.: Типография Императорской академии наук, 1893. – 580 с.

16. Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. – М.: ГЕОС, 2003. – 153 с.

17. Певнев А.К., Заалишвили В.Б. О причинах коровой сейсмичности и возможности прогноза землетрясений методами решения прямых задач. // Геология и геофизика Юга России, – 2014. – №4. Т. 2. – С. 91–98.

18. Певнев А.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. О модернизации геодезических ис-следований на Владикавказском геодинамическом прогножном полигоне. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – №4. Т. 2. – С. 84–90.

19. Певнев А.К. Чрез тернии – к прогнозу землетрясений. // Геология и Геофизика Юга России. – 2020. – №10. Т.2. – С. 82–94. DOI: 10.46698/VNC.2020.25.51.006

20. Пустовитенко Б.Г., Лущик А.В., Боборыкина О.В., Кульчицкий В.Е., Можжерина А.В., Насонкин В.А., Панков Ф.Н., Поречнова Е.И., Пустовитенко А.А., Тихоненков Э.П., Швырло Н.И. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. – 264 с.

21. Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д. и др. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза. / Отв. ред. А.О. Глико. – М.: ООО «Светоч Плюс», 2011. – 368 с.

22. Рогожин Е.А., Милюков В.К. Спутниковый геодезический мониторинг и сейсмические проявления зоны Владикавказского активного разлома. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №4. – С. 102–110.

23. Рогожин Е.А., Милюков В.К., Миронов А.П., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н. Характеристики современных горизонтальных движений в зонах заметных землетрясений начала 21-го века в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с глубинным строением земной коры. // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. Т. 2. / Отв. ред. К.Е. Дегтярев. – М.: ГЕОС, 2019. – С. 173–178.

24. Саяпина А.А., Багаева С.С., Горожанцев С.В. Краткая история создания и этапы развития сейсмологической службы в Республике Северная Осетия-Алания (к 80-летию

Э.В. Погоды и 20-летию образования СОФ ФИЦ ЕГС РАН). // Вестник Владикавказского научного центра РАН. – 2019. – Т. 19. № 2. С. 56–64.

25. Свалова В.Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 76–92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

26. Сим Л.А., Гордеев Н.А. Сравнение результатов изучения тектонических напряжений Кавказа разными методами // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. Материалы ЛIII Тектонического совещания. Т. 2 / Отв. ред. К.Е. Дегтярев. – М.: ГЕОС, 2022. – С. 175–178.

27. Стогний В.В., Стогний Г.А. Блоковое строение и современные движения поверхности земной коры Северо-Западного Кавказа // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том IX. / Под ред. И.А. Керимова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2019. – С. 506–510.

28. Стогний Г.А., Стогний В.В. Сейсмичность Большого Кавказа с позиции блоковой делимости земной коры. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). – 2017. – №2. – С. 86–95.

29. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

30. Яновская Т.Б. К истории российской сейсмологии. // Вопросы геофизики. – 2014. – Вып. 47. (Учёные записки СПбГУ, № 447). – С. 32–41.

31. Burmin V.Yu. Evaluation of the effectiveness of the network of seismological observations in the Caucasus. // Seismic instruments. – 2018. – Vol. 54. No. 2. – pp. 24–32. DOI: 10.21455/si2018.2-2.

32. Gahalaut V.K., Yadav Rajeev K., Sreejith K.M., Gahalaut K., Bürgmann R., Agrawal R., Sati S.P. and Kumar A. InSAR and GPS measurements of crustal deformation due to seasonal loading of Tehri reservoir in Garhwal Himalaya, India. // Geophysical Journal International. – 2017. DOI: 10.1093/gji/ggx015

33. Leonov Yu.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rastsvetaev L.M. Interrelation of late Cenozoic stresses and deformations in the Caucasian sector of the Alpine belt and in its northern platform framing. // Geotectonics. – 2001. – No. 1. – pp. 36–59.

34. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C. Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanlı I., Seeger H., Tealeb A., Toksoz M.N., Veis G. 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: 10.1029/1999 JB900351.

35. Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS network. // J. Geod. – 2010. – No.49. – pp. 216–223. DOI: 10.1016/j.jog.2009.10.003.

36. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. // Geotectonics. – 2015. – No. 3. – pp. 56–65. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123.

37. Pevnev A.K. Substantiation of the main concepts for the deformation model of the crustal earthquake source preparation. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2021. – Vol. 11. No.1. – pp. 104–120. DOI: 10.46698/VNC. 2021.53.34.009.

38. Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements. // Geoph. Res. Letters. – 1997. – No.14. – pp. 1815–1818.

39. 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., Gomez F., Al-Ghazzi R., Gebran Karam. 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. – Vol. 111. No.5. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051

40. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. Structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. // *Geotectonics*. – 2015. – No. 2. – pp. 36–49.

41. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishin A.V., Prilepin M.T. et al. Modern geodynamics of the Caucasus (according to the results of GPS measurements and seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 1999. – No. 9. – pp. 3–18.

42. Srijayanthi G., Ravi Kumar M., Gahalaut V.K. A review of seismological research in India during the past five years (2015–2019). // *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* – 2020. – Vol. 86. No.1. – pp. 531–552. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49794

43. Tan O., Taymaz T. Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. / Dilek Y., Pavlides S. (eds.). *Postcollisional tectonics and magmatism in Mediterranean region and Asia: Geological Society of America Special Paper*. – 2006. – Vol. 409. – pp. 531–578. DOI: 10.1130/2006.2409 (25).

44. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. // *International Geology Review*. – 2003. – Vol. 45. – pp. 191–212. DOI: 10.2747/0020-6814.45.3.191.

45. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 156(1). – pp. 226–245. DOI: Org/10.1016/j.jseaes.2018.01.025.

46. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 88. – pp. 104108. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104108.

47. Trifonov V.G. Collision and mountain building. // *Geotectonics*. – 2016. – No. 1. – pp. 3–24.

48. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2007. – No. 7. – pp. 31–45.

49. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. // *The Open Construction and Building Technology Journal*. – 2011. – No.5. – pp. 30–40.

References

1. Ananin I.V. Seismicity of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1977. 148 p. (In Russ.)
2. Babeshko V.A., Yubko V.M., Glazyrin E.A., Shestopalov V.L. The nature of the movements of the surface of the Earth's crust according to GPS-measurements in the region of the Azov-Black Sea coast of the Russian Federation. *Science in the South of Russia*. 2016. Vol. 12. No. 4. pp. 33–40. (In Russ.)
3. Velichko S.V., Glazyrin E.A., Sheremetiev V.M., Shestopalov V.L. Monitoring of geodynamic activity of the Tuapse-Sochi seismically active zone according to GPS-observations. *Engineering geology of the North-Western Caucasus and Ciscaucasia: current state and main tasks. Scientific Proceedings. Krasnodar, Prosveshenie-Yug*. 2016. pp. 41–47. (In Russ.)
4. Gabsatarova I.P., Malovichko A.A., Starovoit O.E. History of Instrumental Seismic Observations in the North Caucasus (Essay). *Geophysical journal*. 2008. Vol. 30. No. 5. pp. 50–72. (In Russ.)

5. Gabsatarova I.P., Koroletski L.N., Ivanova L.E., Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Adilov Z.M., Asmanov O.A. Seismicity of the North Caucasus in 2015. Earthquakes of Northern Eurasia. 2021. Issue 24. 2015. pp. 69–83. (In Russ.)
6. Geological map of the Caucasus. Scale 1:500,000. Ed. D.V. Nalivkin. Moscow. NPO Aerogeologiya. 1978. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. Seismic hazard assessment of the territory and construction of probability maps. *Geology and geophysics of Russian South*. 2011. Vol. 1. No.1. pp. 48–59. (In Russ.)
8. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S. Development of GPS/GLONASS Observation Networks on the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 10th Anniversary of the Foundation of the KNII RAS “Science and education in the Chechen Republic: state and development prospects”, April 7, 2011, KNII RAS 2011, pp. 325–327. (In Russ.)
9. Zaalishvili V.B., Guseva T.V., Rosenberg N.K., Melkov D.A. Practical implementation of geodetic monitoring the example Vladikavkaz geodynamic looking range. *Geology and geophysics of Russian South*. 2016. Vol. 6. No. 3. pp. 58–64. DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20830 (In Russ.)
10. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S. Instrumental analysis of dangerous natural-technogenic processes in the territory of North Ossetia. *Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus*. Vol. VII. Part 2. IHST RAS, 2017. pp. 89–100. (In Russ.)
11. Zaalishvili V.B., Pevnev A.K., Kanukov A.S. Geodetic predictive monitoring on the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. No.4 (75). pp. 7-11. (In Russ.)
12. 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.)
13. Malovichko A.A., Gabsatarova I.P. Seismic hazard and seismic monitoring of the Black Sea region of the Russian Federation. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation (BSEC)*. 2012. No. 1. pp. 98–105. (In Russ.)
14. Malovichko A.A., Gabsatarova I.P., Dyagilev R.A., Mekhryushev D.Yu., Zvereva A.S. Assessment of the registration capabilities of a seismic network in the western part of the North Caucasus through the geometry of the network and the local level of microseismic noise. *Seismic instruments*. 2020. Vol. 56. No. 3. pp. 35–60. DOI: 10.21455/si2020.3-3 (In Russ.)
15. Mushketov I.V., Orlov A.P. Catalog of earthquakes in the Russian Empire. Notes of the Russian Geographical Society on General Geography. Volume XXXVI. Saint Petersburg. Imperial Academy of Sciences. 1893. 580 p. (In Russ.)
16. Pevnev A. K. Ways to the practical forecast of earthquakes. Moscow. GEOS, 2003. 153 p. (in Russ.)
17. Pevnev A.K., Zaalishvili V.B. On the causes of crustal seismicity and the possibility of earthquake prediction by methods of solving direct problems. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2014. No.4. pp. 91-99. (in Russ.)
18. Pevnev A.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. On the geodetic studies modernization on the Vladikavkaz geodynamic forecast polygon, *Geology and Geophysics of Russian South*, 2014. No.4. pp. 84 90. (in Russ.)
19. Pevnev A. K. Through difficulties to the earthquake prediction. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10(2). pp. 82 94. DOI: 10.46698/VNC.2020.25.51.006 (in Russ.)
20. Pustovitenko B.G., Lushchik A.V., Boborykina O.V., Kulchitsky V.E., Mozhzherina A.V. et al. Monitoring of seismic processes in the Crimean-Black Sea region. Sevastopol, SPC ECOSY Hydrophysics, 2014. 264 p. (In Russ.)
21. Rogozhin E.A., Ioganson L.I., Zavyalov A.D. Potential seismic sources and seismological precursors of earthquakes are the basis of real seismic forecasting, *At. Rep. ed. A. O. Gliko*.

Moscow. Svetoch Plus LLC, 2011. 368 p. (in Russ.)

22. Rogozhin E.A., Milyukov V.K. Satellite geodetic monitoring and seismic manifestations of the Vladikavkaz active fault zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No.4. pp. 102-110. DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20904 (in Russ.)

23. Rogozhin E.A., Milyukov V.K., Mironov A.P., Gorbatikov A.V., Ovsyuchenko A.N. Characteristics of modern horizontal movements in the zones of noticeable earthquakes of the early 21st century in the central sector of the Greater Caucasus according to GPS observations and their relationship with the deep structure of the Earth's crust. In: *Proceedings of the LI Tectonic Conference Prob. of tect. of cont. and oceans*. Vol. 2. Moscow. GEOS, 2019. pp. 173–178. (In Russ.)

24. Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Gorozhantsev S.V. A brief history of the creation and development stages of the seismological service in the Republic of North Ossetia-Alania (to the 80th anniversary of E.V. Pogoda and the 20th anniversary of the formation of the SOF FRC EGS RAS). *Bulletin of the VSC RAS*. 2019. Vol. 19. No. 2. pp. 56–64. (In Russ.)

25. Svalova V.B. Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical-mathematical modeling. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 76–92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007. (In Russ.)

26. Sim L.A., Gordeev N.A. Comparison of the results of studying the tectonic stresses of the Caucasus by different methods. In: *Proceedings of the LIII Tectonic Conference Tect. and Geod. of the Earth's Crust and Mantle*. Vol. 2. Moscow. GEOS, 2022. pp. 175–178. (In Russ.)

27. Stogniy V.V., Stogniy G.A. Block structure and modern movements of the Earth's surface of the North-Western Caucasus. In: *Proc. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Vol. IX. Moscow. IHST RAS, 2019. pp. 506–510. (In Russ.)

28. Stogniy G.A., Stogniy V.V. Seismicity of the Greater Caucasus from the standpoint of the block divisibility of the Earth's crust. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation (BSEC)*. 2017. No. 2. pp. 86–95. (In Russ.)

29. Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005. (In Russ.)

30. Yanovskaya T.B. On the history of Russian seismology. *Problems of geophysics*. 2014. Issue 47. No. 447. pp. 32–41. (In Russ.)

31. Burmin V.Yu. Evaluation of the effectiveness of the network of seismological observations in the Caucasus. *Seismic instruments*. 2018. Vol. 54. No. 2. pp. 24–32. DOI: 10.21455/si2018.2-2.

32. Gahalaut V.K., Yadav Rajeev K., Sreejith K.M., Gahalaut K., Bürgmann R., Agrawal R., Sati S.P. and Kumar A. InSAR and GPS measurements of crustal deformation due to seasonal loading of Tehri reservoir in Garhwal Himalaya, India. *Geophysical Journal International*. 2017. DOI: 10.1093/gji/ggx015.

33. Leonov Yu.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rastsvetaev L.M. Interrelation of late Cenozoic stresses and deformations in the Caucasian sector of the Alpine belt and in its northern platform framing. *Geotectonics*. 2001. No. 1. pp. 36–59.

34. 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.

35. Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS network. *J. Geod.* 2010. No.49. pp. 216–223. DOI: 10.1016/j.jog.2009.10.003.

36. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblou G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. *Geotectonics*. 2015. No. 3. pp. 56–65. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123.

37. Pevnev A.K. Substantiation of the main concepts for the deformation model of the crustal earthquake source preparation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol.11(1). pp.

104 – 120. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.34.009.

38. Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements. *Geoph. Res. Letters*. 1997. No.14. pp. 1815–1818.

39. Reilinger R., 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. Vol. 111. No.5. Issue B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051

40. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. Structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49.

41. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishin A.V., Prilepin M.T. et al. Modern geodynamics of the Caucasus (according to the results of GPS measurements and seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1999. No. 9. pp. 3–18.

42. Srijayanthi G., Ravi Kumar M., Gahalaut V.K. A review of seismological research in India during the past five years (2015–2019). In: *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* 2020. Vol. 86. No.1. pp. 531–552. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49794

43. Tan O., Taymaz T. Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. Dilek Y., Pavlides S. (eds.). *Postcollisional tectonics and magmatism in Mediterranean region and Asia: Geological Society of America Special Paper*. 2006. Vol. 409. pp. 531–578. DOI: 10.1130/2006.2409 (25).

44. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. *International Geology Review*. 2003. Vol. 45. pp. 191–212. DOI: 10.2747/0020-6814.45.3.191.

45. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 156(1). pp. 226–245. DOI: Org/10.1016/j.jseaes.2018.01.025.

46. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 88. pp. 104108. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104108.

47. Trifonov V.G. Collision and mountain building. *Geotectonics*. 2016. No. 1. pp. 3–24.

48. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2007. No. 7. pp. 31–45.

49. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2011, 5. pp. 30–40.