

УДК 550.34.06, 550.34.06.013.3, 550.348.433

## АНАЛИЗ РОЕВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ ЭЛЬБРУССКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

© 2023 г. З. И. Дударов<sup>а</sup>, \*, И. Ю. Дмитриева<sup>б</sup>, \*\*, А. А. Саяпина<sup>б</sup>, \*\*, С. С. Багаева<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской Академии наук”,  
просп. Ленина, 189, Обнинск Калужской обл., 249035 Россия

<sup>б</sup>Северо-Осетинский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба  
Российской Академии наук”, ул. Маркова, 93а, Владикавказ, РСО-Алания, 362002 Россия

\*e-mail: zalim-dudar@yandex.ru

\*\*e-mail: sofgras@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

После доработки 03.03.2023 г.

Принята к публикации 04.09.2023 г.

В работе представлены результаты анализа роевых сейсмических событий, зарегистрированных в 2018 г. в районе Эльбрусского вулканического центра (ЭВЦ) Северокавказской сейсмологической сетью Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (ФИЦ ЕГС РАН). Стандартным методом станционной обработки определены гипоцентры зафиксированных событий в районе ЭВЦ. В программном комплексе LOS, сложным комбинированным алгоритмом локации, методами минимизации невязки времени в очаге и поиска по сетке с перебором глубин уточнены гипоцентры сейсмических событий роевых последовательностей. Описанный подход повышает достоверность локации из-за учета неточностей, связанных с неправильно взятыми временами вступления фаз и незначительными отклонениями времени пробега, зависящими от используемой скоростной модели среды. По результатам исследования механизмов очагов наиболее сильных землетрясений установлен тип движения, согласующийся с кинематикой Эльбруско-Минераловодской зоной сбросо-сдвиговых нарушений. Корреляционный анализ волновых форм вертикальной компоненты фильтрованных в диапазоне частот 1–10 Гц, включающих  $P$  и  $S$  волны, по ближайшей станции показывает высокое совпадение анализируемых данных (коэффициент корреляции  $R \geq 0.85$ ), которое указывает высокую вероятность того, что события имеют подобные источники и пути распространения сейсмических волн. Сравнение спектральной плотности мощности отдельных землетрясений роевых последовательностей также демонстрирует высокое подобие.

*Ключевые слова:* сейсмическое событие, землетрясение, рой, Эльбрусский вулканический центр, разлом, вулкан Эльбрус

DOI: 10.31857/S0203030623700359, EDN: SNVBVK

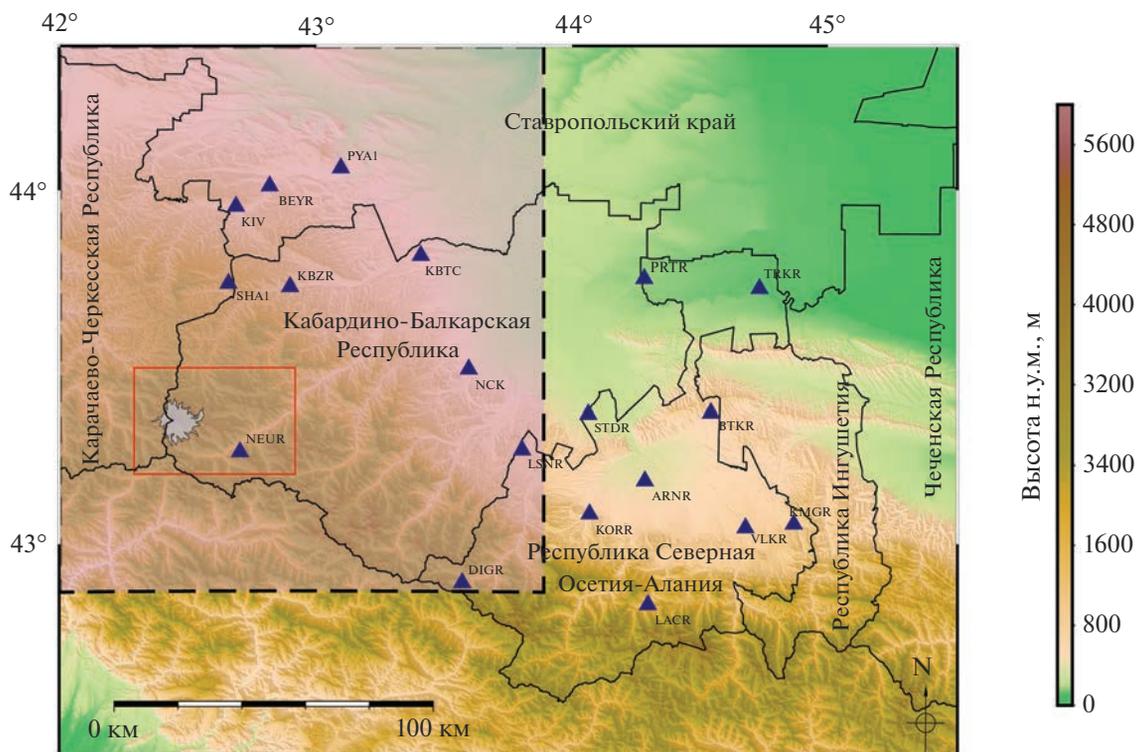
### ВВЕДЕНИЕ

Территория Северного Кавказа с сейсмической точки зрения относится к одному из активных регионов России, где возможны крупные катастрофические землетрясения с высокой магнитудой. Современные геодинамические процессы, образование складчато-надвиговых структур, проявление вулканизма и сейсмичности в кавказском сегменте Альпийско-Индонезийского подвижного пояса связаны с взаимодействием Евразийской и Аравийской литосферных плит. По картам общего сейсмического районирования Северной Евразии (ОСР-97, ОСР-2016) [Уломов, Шумилина, 1999; Уломов и др., 2016] значительная часть территории Большого Кавказа расположена в зоне, которая характеризуется возможны-

ми 8-ми и 9-ти балльными сотрясениями земной поверхности.

В центральной части Кавказа расположен Эльбрусский вулканический центр, который представляет несомненную опасность для юга России, создавая угрозу от извержений для населения и экономики региона. Эндогенные процессы в этом регионе могут спровоцировать комплекс опасных склоновых явлений — подвижки ледников, сели, оползни, обвалы и т.д. Описанные обстоятельства диктуют необходимость постоянного изучения и мониторинга природных явлений, протекающих в этой области.

Впервые в истории инструментальных наблюдений в районе ЭВЦ, в непосредственной близости от вулкана Эльбрус, сейсмологической сетью



**Рис. 1.** Федеральная сейсмическая сеть на территории Центрального Кавказа. Треугольниками показаны положения цифровых сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Сплошным прямоугольником выделен район исследований, а область с штриховым контуром соответствует зоне функционирования скоростной модели, используемой в расчетах.

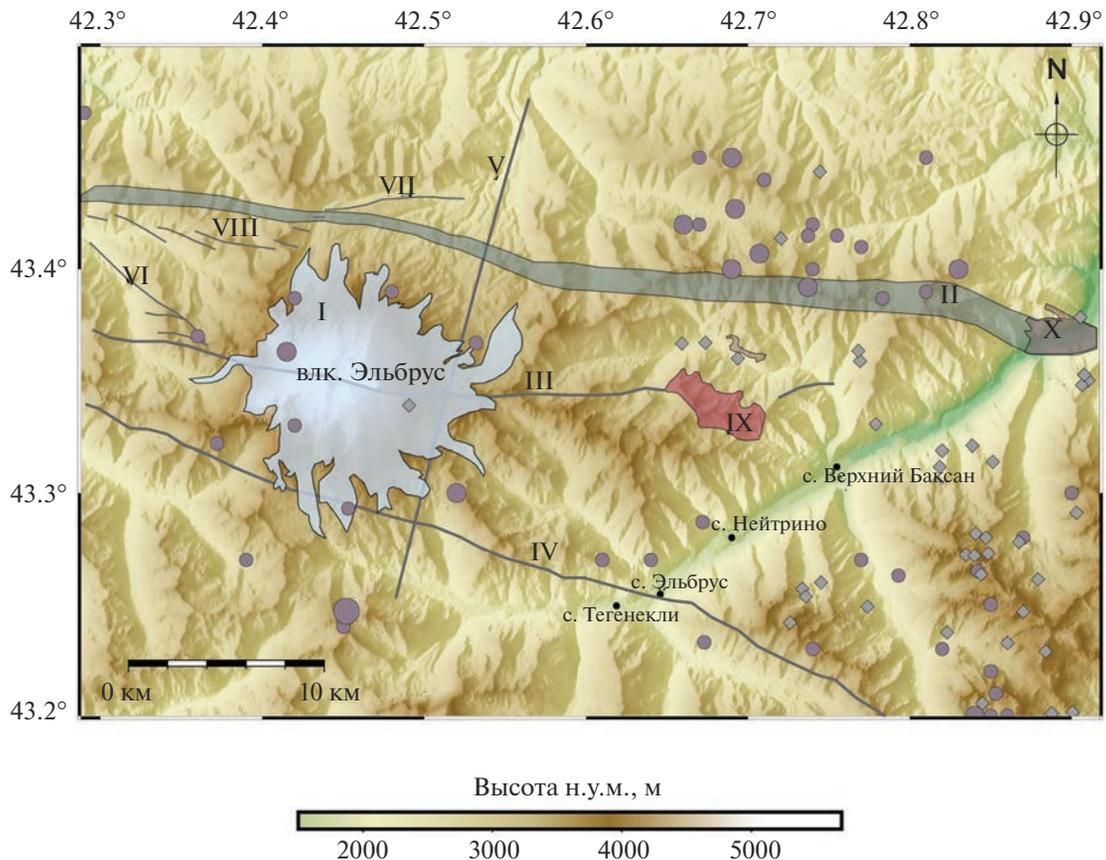
ФИЦ ЕГС РАН (рис. 1) зарегистрированы роевые последовательности землетрясений. Рой землетрясений – это особый вид сейсмических событий, который обычно относится к серии малых и средних землетрясений, происходящих на определенной небольшой территории в течение относительно короткого периода времени.

Основными задачами исследования являются изучение особенностей записей зарегистрированных землетрясений, определение их очагов разными методами, получение кинематических характеристик основных толчков по данным фокальных механизмов и анализ волновых форм и спектров мощности некоторых землетрясений для понимания приуроченности этих событий к одному источнику. Также, в работе проведены исследования взаимосвязи проявленных роевых землетрясений с разломными структурами и с современным состоянием Эльбурского вулканического центра.

#### ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эльбурский вулканический центр на сегодняшний день является самым крупным из существующих на территории Большого Кавказа. Ос-

новным элементом этого центра является вулкан Эльбрус, который относится к длительно развивающейся системе сложного строения с разными типами извержений. Последняя активизация вулкана относится к позднему голоцену, с крупными извержениями, сопровождавшимися излияниями лавовых потоков и выбросами пепла [Масуренков и др., 2010]. Разломная тектоника ЭВЦ имеет сложную структуру, которая формируется разнохарактерными нарушениями близширотного и близмеридионального простирания (рис. 2). Наиболее значимой из них является протяженная на сотни километров Пшекиш-Тырныузская шовная зона близширотной ориентации. Также субширотным является Сылтранский активный разлом, проходящий через постройку вулкана Эльбрус. Южнее указанных разрывов прослеживается Адылсуйский активный правосторонний сдвиг. По данным [Рогожин и др., 2005, 2014; Никонов, 1991], в зонах этих разломов обнаружены многочисленные сейсмодислокации, как первичного генезиса сеймотектонического (результаты деятельности сейсмических событий, произошедших в голоцене), так и вторичного сейсмогравитационного и вибрационного генезиса. Кроме того, в тектонический разломный аппарат ЭВЦ входят близмеридиональный Малкинский разлом северо–северо-восточного



**Рис. 2.** Карта разрывных нарушений Эльбурского вулканического центра.

Обозначения на карте: I – оледенение Эльбруса; II – Пшекиш-Тырныаузская шовная зона; III – Сылтранский разлом; IV – Адылсуйский разлом; V – Малкинский разлом; VI – Кюкюртлинский разлом; VII – Кызылкольский разлом; VIII – Чемарткольский разлом; IX – дацитовые лавы неоплейстоценового возраста; X – интрузии неогенового возраста. Информация по разломам представлена по данным [Рогожин и др., 2018]. Сейсмичность территории ЭВЦ представлена кружками и маркерами в виде ромбиков по данным [Землетрясения России, 2015; Malovichko et al., 2017; Маливичко и др., 2017].

простираения и ряд малопротяженных меридиональных уступов, отражающих на поверхности второстепенные разрывные нарушения. Наличие множества продольных и поперечных разломов в пределах ЭВЦ и мегантиклинория Кавказа в целом, свидетельствует о блоковом характере строения геологической среды [Карта разломов ..., 1980; Краснопевцева, 1984; Бачманов и др., 2017]. В работе [Гаретовская и др., 1984] установлено, что северная часть Большого Кавказского хребта, к которому приурочен ЭВЦ, является одним из активных в геодинамическом плане регионов России, который характеризуется интенсивными движениями земной коры. Оценка скоростей смещений по данным Северокавказской геодезической сети и Глобальной навигационной спутниковой системы показывает движение структур Большого Кавказа в север–северо-восточном направлении со скоростью 27–28 мм/год в отсчетной системе ITRF2014, при общем сжатии регио-

на со скоростью 1–2 мм/год относительно неподвижной Евразии [Милуков и др., 2015, 2022].

Исследованием Эльбурского вулканического центра занимались многие ученые [Милановский, Короновский, 1960; Масуренков, 1961; Богатиков и др., 2002]. Он был изучен с разных геофизических и геологических точек зрения. В рамках исследований [Арбузкин и др., 2002] изучены структурные особенности осадочного чехла и герцинского фундамента, определен рельеф глубинных разделов, вертикальных и латеральных неоднородностей земной коры и верхней мантии, выявлены и изучены геофизические характеристики глубинных разломов и ослабленных зон. При помощи технологии дистанционного зондирования [Нечаев, 2010; Нечаев, Собисевич, 2007; Богатиков и др., 2002] в районе ЭВЦ выделена область аномально пониженных значений поля тектонической раздробленности, интерпретируемая как потенциальная магматическая камера, а в работах [Собисевич, Руденко, 2005; Собисевич, 2012;

Мясников, Милоков, 2015, 2017] построены математические модели и исследованы резонансные свойства магматического очага и камеры вулкана Эльбрус. В более поздних исследованиях [Рогожин и др., 2018; Горбатиков и др., 2018; Дударов и др., 2016; Лиходеев и др., 2017], связанных с анализом микросейсмического поля в районе ЭВЦ, показано современное состояние его глубинного строения. Было установлено, что выявленные на разных глубинах разуплотненные низкоскоростные структуры под вулканом соответствуют периферическим элементам флюидно-магматической системы Эльбруса [Лиходеев и др., 2017].

Первые сейсмические исследования [Хитаров и др., 1984], проведенные на вулканической постройке Эльбруса, позволили зафиксировать события с интенсивными поверхностными волнами, резко отличавшимися от местных землетрясений, регистрируемых в прилегающих территориях Северного Кавказа. Отмечалось, что наблюдаемые события имели низкочастотный состав колебаний, основная полоса частот — 1–2 Гц. Такой частотный состав был интерпретирован авторами как подтверждение существования под Эльбрусом зоны повышенного поглощения сейсмических волн. Позже, после развития сейсмологических наблюдений в районе ЭВЦ [Маловичко и др., 2011], выявлены зоны повышенного затухания сейсмических волн под вулканическим центром [Маловичко и др., 2014].

Сейсмические события ЭВЦ в основном являются мелкофокусными. Глубина залегания гипоцентров не превышает 20 км, и находятся в пределах осадочного чехла и верхней части консолидированной коры, наиболее подверженной механическим деформациям.

### СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

Непрерывный сейсмический мониторинг всей территории Северного Кавказа осуществляется станциями сейсмических сетей Центрального отделения, Северо-Осетинского и Дагестанского филиалов ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.gsras.ru/new/struct/>). Всего в регионе функционируют порядка 60 станций, оснащенных цифровым оборудованием с защищенными каналами и передачей данных в информационно-обрабатывающие центры в режиме, близком к реальному времени. Наблюдательные пункты оборудованы трехкомпонентными широкополосными станциями типа Trillium Compact TC120 с регистраторами Centaur, Guralp CMG-3ESPC, сейсмодатчиками CM-3OC в паре с UGRA, а также используются короткопериодные приемники CM-3KB с регистраторами UGRA или SDAS.

Изучение сейсмических процессов, происходящих в Центральной части Северного Кавказа, в том числе на территории Эльбрусского вулканического центра осуществляются в основном локальной сетью СОФ ФИЦ ЕГС РАН и Лабораторией сейсмического мониторинга Кавказских Минеральных Вод Центрального отделения (см. рис. 1). В случае необходимости при обработке результатов наблюдений используются данные зарубежных станций, которые размещены в северо-западной части Грузии. Указанные сети позволяют без пропусков регистрировать землетрясения с магнитудой 1.2 и более на территории Республики Северная Осетия–Алания, в районе Кавказских Минеральных Вод, Кабардино-Балкарской Республики, большей части Чеченской Республики и Республики Ингушетия [Погода и др., 2013; Габсатарова и др., 2019]. Анализ спектральных характеристик сейсмических шумов [Погода, Дмитриева, 2013; Погода и др., 2016] на станциях показывает, что большинство из них имеют средний уровень шумов в сравнении с общепринятой моделью [Peterson, 1993].

В рабочем диапазоне частот наиболее низким уровнем шумов обладают регистрационные пункты DIGR (Дигорское ущелье), LACR (Лац), LSNR (Лескен) и NEUR (Нейтрино) [Маловичко и др., 2011], которые позволяют регистрировать события с низким энергетическим классом.

### ДАнные И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Исходными данными в нашей работе являются волновые формы сейсмических станций Северокавказской сети ФИЦ ЕГС РАН, которые зарегистрировали в районе Эльбрусского вулканического центра в январе и марте 2018 г. две рыевые последовательности, также использовались составленные по результатам обработки региональные каталоги и станционные бюллетени.

Первый рой в ЭВЦ включал в себя 15 землетрясений с магнитудой  $0.3 \leq M_s \leq 3.2$  и длился с 25 по 30 января. При этом наибольшее число событий произошло 30 января. Второй рой охватывает 44 толчка с магнитудой  $0.1 \leq M_s \leq 2.9$ . Из них 34 землетрясения произошли в течение двух часов 26 марта. Формирование второго роя завершилось 30 марта.

#### *Методика станционной обработки*

Расчет основных параметров очагов землетрясений выполнялся в два этапа. На первом этапе для обработки и анализа цифровых данных сейсмических станций применялась методика станционной обработки цифровых записей, реализованная в программно-вычислительном комплексе Windows Seismic Grafer (WSG) [Красилов

и др., 2006; Акимов, Красилов, 2020]. Сейсмические события подвергались обработке лишь в случае уверенного выделения сейсмических фаз на трех и более станциях.

Алгоритм промежуточной обработки в WSG включал в себя:

- идентификацию фаз продольной и поперечной волн на исходном или преобразованном (фильтрованном) сигнале с указанием направления смещения первого движения в случае четких вступлений  $P$ -волн;
- оценку эпицентрального расстояния по разности фаз  $P$  и  $S$  волн;
- измерение амплитуды и периодов сейсмических волн для последующей оценки энергетических характеристик сейсмического события.

На втором этапе определение параметров гипоцентров проводилось программой Нуро71 [Lee, Valdes, 1985] с использованием скоростной модели исследуемого района (рис. 3) [Гаретовская, 1986]. Данная скоростная модель была получена по данным интерпретации материалов Глубинного сейсмического зондирования профиля Степное–Бакуриани [Юров, 1963; Краснопевцева и др., 1970], а также с использованием данных промышленных взрывов, зарегистрированных на территории Тырныузского вольфрамо-молибденового комбината. Выделенная штриховой линией область с полупрозрачной заливкой на рис. 1 соответствует зоне функционирования скоростной модели исследуемого региона [Гаретовская, 1986], используемой в производственной практике ФИЦ ЕГС РАН.

Программа Нуро71 рассчитывает времена пробега объемных волн по адаптированной скоростной модели изучаемого района и по минимизации функционала невязок, используя алгоритм пошаговой статистической регрессии Дрейпера и Смита [Draper, Smith, 1966] и критерий Фишера для проверки пригодности модельного решения, который устанавливается в соответствии с числом и качеством используемых  $P$  и  $S$  вступлений. Иначе говоря, используя положения сейсмических станций, скоростную модель и вступления фаз, программа итерационным способом подбирает гипоцентр и время в очаге, где сводятся к минимуму квадратичная погрешность времен вступлений всех станций.

Локация близких и местных землетрясений на Северном Кавказе по данным региональных станций проводится в модифицированной версии программы, которая позволяет рассчитывать энергетический класс по методу Раутиан [Раутиан, 1960, 1964] и значения магнитуд с учетом калибровочной кривой для Северного Кавказа.

На рис. 4а представлены полученные результаты локации землетрясений роевых последовательностей методом стационарной обработки. Эпицентры первого роя распределены неравномерно в радиусе 12 км, с глубиной залегания гипоцентров от 1.0 до 19 км. Больше половины землетрясений обработано более чем десятью станциями, на записях которых уверенно выделялись  $P$  и  $S$  волны. Ближайшая станция “Нейтрино” удалена на расстояния 14–18 км.

Пространственное распределение событий второго роя также имело довольно большой разброс по площади, порядка 100 кв. км. Гипоцентры землетрясений данного роя определены на глубинах 6–14 км. Большинство землетрясений второго роя были зарегистрированы и обработаны малым количеством станций. Скорее всего, с этим связан наблюдаемый разброс, так как программа Нуро71 дает хорошие результаты при большом числе станций, окружающих эпицентр.

По данным [Землетрясения России, 2015] за период 2003–2020 гг. в местах проявления роевых последовательностей фиксировались одиночные сейсмические события, разнесенные в пространстве и во времени, указывающие на слабую сейсмическую активность региона (см. рис. 2). На карте они отражены в виде серых кружков. Также в этой области фиксировались локальной группой “Нейтрино” ФИЦ ЕГС РАН [Malovichko et al., 2017; Маловичко и др., 2017] события с низким энергетическим классом (маркеры в виде ромбов) (см. рис. 2).

#### *Уточнение гипоцентров в программном комплексе LOS*

С целью проверки и уточнения гипоцентров, полученных в результате стандартной стационарной обработки, использовали программный комплекс LOS [Асминг и др., 2021, 2021]. Входными данными для программы являются волновые формы или, как в нашем случае, времена прихода  $P$  и  $S$  волн сейсмических станций, которые регистрировали землетрясение. Так же, как и в случае стандартной локации, при уточнении положений гипоцентров в LOS, использовали региональную скоростную модель [Гаретовская, 1986], по которой рассчитывали теоретические времена пробега сейсмических волн от источника сигнала до пунктов регистрации.

Уточнение гипоцентров проводили по сложному комбинированному алгоритму, который выполняется в несколько этапов.

1. В первую очередь, методом минимизации невязки времени в очаге в первом приближении определяются координаты сейсмических собы-

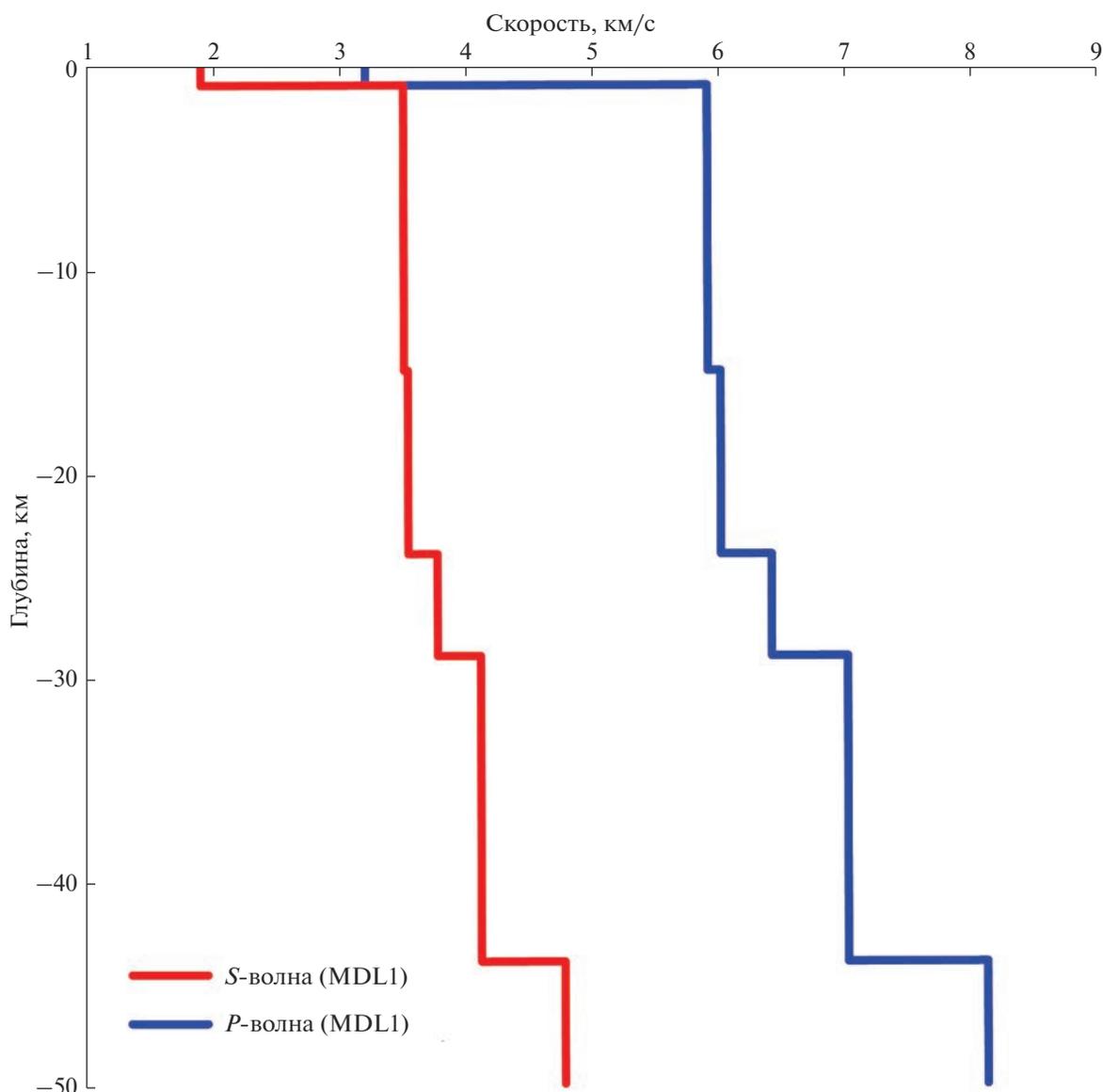
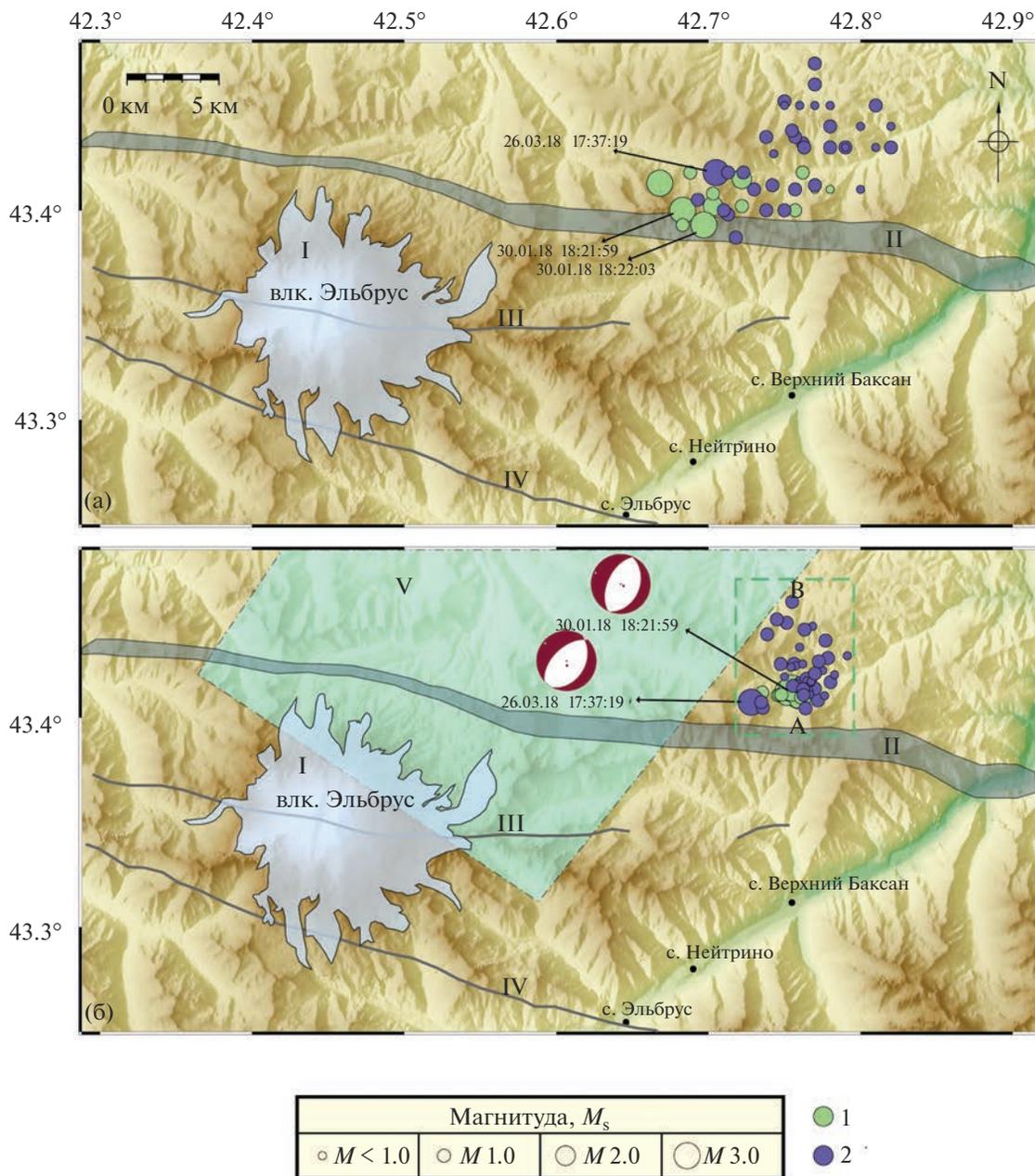


Рис. 3. Скоростная модель территории Эльбрусского вулканического центра [Гаретовская, 1986].

тий. Для этого, из указанной стартовой точки делаются шаги равной длины по всем возможным азимутам через каждые  $45^\circ$  в виде “ромашки” с 8 вершинами, и в каждой точке рассчитываются соответствующие значения невязки. Далее из пикета с минимальной невязкой делается следующий шаг. Процесс повторяется до тех пор, пока каждый ход уменьшает значение невязки. Когда поиск с начальным шагом заканчивается, в соответствии с заранее заданными параметрами в начале работы программы, размер шага уменьшается и продолжается поиск минимума невязки.

2. На втором этапе из полученной конечной точки предыдущего алгоритма выполняется поиск по сетке методом Generalized Beamforming

[Kværna, Ringdal, 1996] для набора глубин от 0 до 30 км. Для каждой глубины, вокруг предварительной локации событий генерируется большой круг, в котором производится поиск. Данный круг покрывается множеством маленьких кругов, которые составляют нашу схему поиска. Для каждой ячейки полученной сетки рассчитывается оценочный рейтинг, показывающий вероятность возникновения события в конкретной ячейке. Затем 75% ячеек с наименьшими рейтингами выбрасываются из сетки, а каждая оставшаяся ячейка трансформируется на четыре меньших и процесс поиска повторяется. В конечном итоге, на последней итерации за результат локации принимается центр ячейки с самым высоким рейтингом.



**Рис. 4.** Пространственное распределение роевых землетрясений в районе Эльбурского вулканического центра: а) результаты первичной станционной обработки; б) эпицентры, уточненные в программном комплексе LOS, и механизмы очагов наиболее крупных событий. Размер эпицентров пропорционален магнитуде.

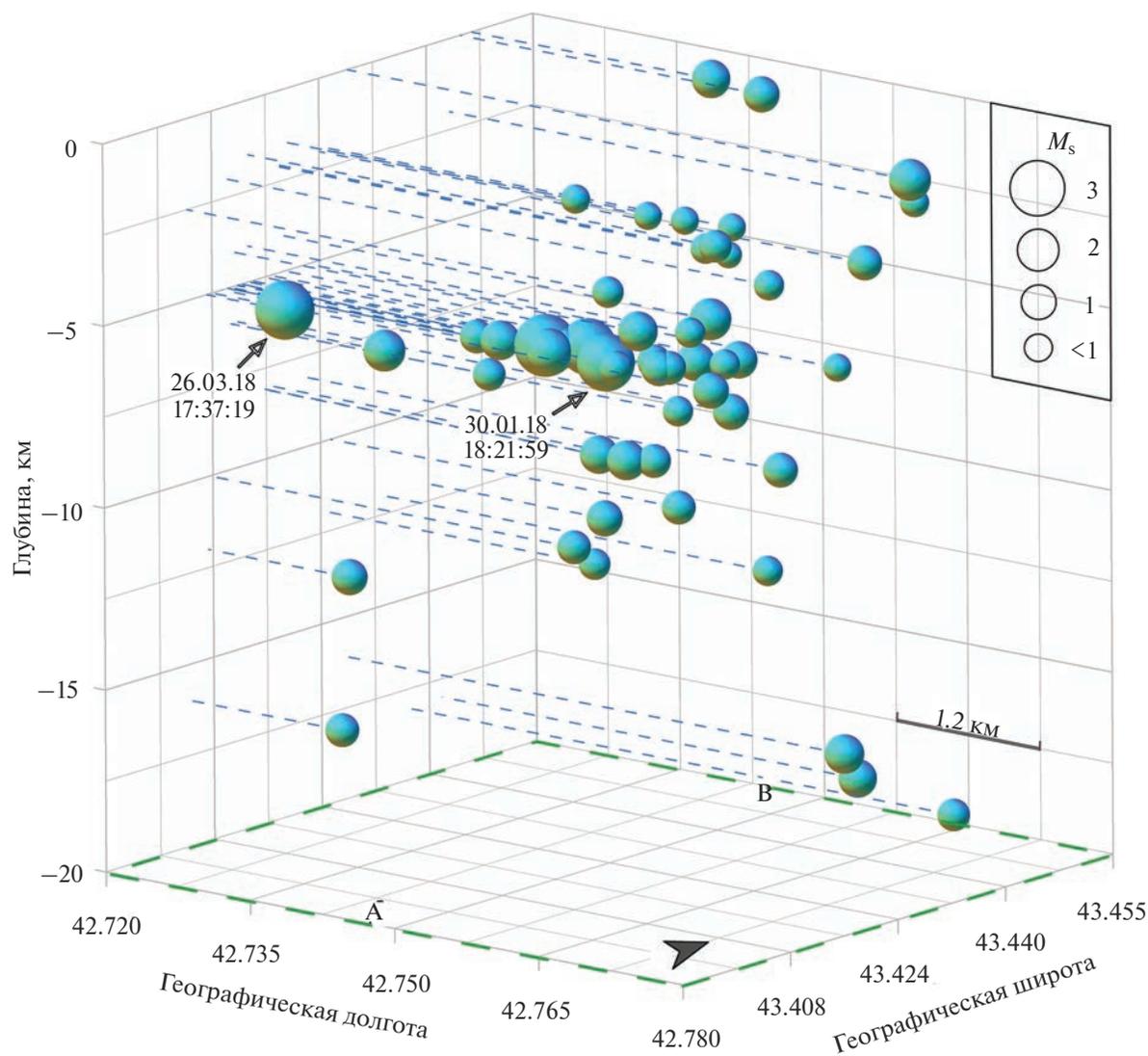
1 – эпицентры январского роя, 2 – эпицентры мартовского роя. Обозначения на карте: I – оледенение Эльбруса; II – Пшекиш-Тырныаузская шовная зона; III – Сылтранский разлом; IV – Адылсуйский разлом; V – Эльбурско-Минераловодская зона сбросо-сдвиговых нарушений. Прямоугольная штриховая область, вдоль А–В соответствует вертикальному разрезу гипоцентров роевых землетрясений (см. рис. 5).

гом. На данном этапе также определяются веса всех используемых для локации фаз.

3. На третьем этапе, из центра оптимальной ячейки, для глубин от 0 до 30 км и с весами фаз выполняется алгоритм минимизации невязки. В результате перебора глубин, за результирующую

глубину выбирается та, которая принимает наименьшее значение невязки.

Такая практика позволяет учесть некие неточности, связанные с неправильно измеренными временами вступлений фаз и незначительными отклонениями времен пробега, зависящими от



**Рис. 5.** Глубинное распределение роевых землетрясений ЭВЦ. Размер эпицентров пропорционален magnitude. Область вдоль А–В соответствует зоне (см. рис. 46) построения глубинного распределения эпицентров.

скоростной модели, которая в свою очередь может отличаться от реальной геологической картины. Полученные с использованием программного комплекса LOS уточненные результаты локализации представлены на рис. 46, а полученные параметры – в табл. 1. Необходимо отметить, что в LOS энергетические характеристики сейсмических событий не пересматривались, поэтому на карте отражены магнитуды, полученные в результате станционной обработки.

Как видно из рисунка, после пересчета гипотендры локализовались в более ограниченной области. С большой степенью вероятности события в январе и марте можно отнести к одному кластеру. Отклонения январских событий по площади

составляет 1.5 км по широте и 3.0 км по долготе, а мартовских – 6.0 км по N и 5.0 км по E. Область сейсмической активности располагалась в 20 км к северо-востоку от вулкана Эльбрус.

Зарегистрированные роевые землетрясения приурочены к Эльбрусско-Минераловодской зоне сбросо-сдвиговых нарушений [Милановский, 1966], которая относится к системе Транскавказского поперечного поднятия в виде полосы сближенных разрывных структур общей шириной до 30 км и прослеживается вдоль оси Минераловодской антиклинали. Данная проницаемая область в эпоху кайнозойского горообразования выполняла магмоподводящую роль и имела важное значение для циркуляции подземных вод [Годзевич,

Таблица 1. Параметры роевых землетрясений

Дата, дд.мм.гг	$t_0$ , ч:мин:с	Координаты эпицентров первичной обработки		Уточненные в LOS координаты эпицентров		$M_s$	$h$ , км
		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E	$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		
25.01.18	12:32:42.1	43.40200	42.70300	43.41047	42.75340	1.8	-5
28.01.18	01:57:13.7	43.40800	42.70300	43.41186	42.76392	0.9	-5
30.01.18	18:21:59.3	43.40000	42.68300	43.41046	42.75936	2.8	-5
30.01.18	18:22:03.1	43.39300	42.69700	43.41202	42.75199	3.2	-5
30.01.18	18:24:11.3	43.41500	42.72200	43.41244	42.75343	1.5	-5
30.01.18	18:39:59.2	43.39300	42.68300	43.41066	42.74579	0.7	-5
30.01.18	18:46:18.1	43.40000	42.75700	43.40769	42.75789	0.7	-10
30.01.18	19:10:34.0	43.41300	42.66800	43.41409	42.75495	2.7	-5
30.01.18	19:29:09.4	43.41800	42.68800	43.41191	42.73530	1.4	-6
30.01.18	20:13:31.9	43.40200	42.72200	43.41091	42.7469	0.6	-6
30.01.18	20:21:29.6	43.41800	42.76200	43.40964	42.76085	0.8	-5
30.01.18	22:17:53.0	43.41700	42.70300	43.41089	42.74805	1.2	-5
26.03.18	17:37:19.0	43.41800	42.70500	43.40735	42.72814	2.9	-5
26.03.18	17:41:05.6	43.44000	42.80000	43.43358	42.75990	0.4	-12
26.03.18	17:41:17.6	43.43000	42.79000	43.42550	42.74755	0.5	-12
26.03.18	17:45:35.5	43.44000	42.78000	43.41639	42.76017	0.7	-8
26.03.18	17:47:17.9	43.41000	42.80000	43.41944	42.75000	0.3	-1.5
26.03.18	17:50:13.1	43.39800	42.71300	43.45517	42.75506	0.8	-5
26.03.18	17:50:56.6	43.41200	42.74200	43.41353	42.76869	0.6	-1.5
26.03.18	17:52:56.6	43.45200	42.75000	43.44518	42.75140	0.9	0
26.03.18	17:54:14.7	43.40000	42.71000	43.40815	42.77191	0.9	-5
26.03.18	17:55:13.4	43.41000	42.73000	43.41496	42.75831	1.2	-8
26.03.18	17:55:57.9	43.41800	42.72300	43.41589	42.76489	1.1	-5
26.03.18	17:56:47.4	43.38700	42.71800	43.43970	42.73866	0.9	-12
26.03.18	17:57:33.6	43.43000	42.82000	43.43671	42.77694	0.6	-18
26.03.18	17:59:11.2	43.43200	42.76200	43.42837	42.77859	1.4	0
26.03.18	18:00:37.4	43.43000	42.76300	43.42561	42.75626	0.7	-10
26.03.18	18:04:36.3	43.43500	42.73800	43.41895	42.76726	1.0	-5
26.03.18	18:05:34.5	43.43000	42.78000	43.40445	42.76384	0.5	-2.5
26.03.18	18:06:18.6	43.45000	42.77000	43.41340	42.76610	0.4	-4
26.03.18	18:07:05.0	43.43000	42.79000	43.44352	42.76843	0.3	-2
26.03.18	18:10:23.1	43.43500	42.75700	43.40468	42.73577	0.7	-16
26.03.18	18:12:44.7	43.40000	42.73800	43.44684	42.74499	1.1	0
26.03.18	18:19:12.7	43.40500	42.69300	43.41856	42.76460	1.4	-4
26.03.18	18:40:37.8	43.41000	42.75700	43.41508	42.75537	1.1	-8
26.03.18	18:41:42.9	43.41800	42.71300	43.41385	42.77000	0.9	-6
26.03.18	18:42:32.1	43.43800	42.75500	43.41253	42.76450	0.7	-5
26.03.18	19:05:02.8	43.45000	42.75000	43.42477	42.75764	0.2	-2
26.03.18	19:05:10.9	43.41200	42.77000	43.41689	42.78031	0.8	0
26.03.18	19:06:02.6	43.42700	42.74300	43.41765	42.76479	0.4	-2
26.03.18	19:08:31.8	43.40000	42.75000	43.40738	42.73472	0.9	-12
26.03.18	19:10:18.9	43.46000	42.77000	43.41680	42.76730	0.4	-5
26.03.18	19:12:01.2	43.45000	42.78000	43.42040	42.78297	0.1	-2
26.03.18	19:18:37.1	43.45000	42.76000	43.42404	42.75430	0.2	-2
26.03.18	19:54:29.9	43.44000	42.82000	43.42945	42.79131	0.1	-2
26.03.18	20:15:25.6	43.46000	42.77000	43.42239	42.77511	0.2	-5
26.03.18	21:27:06.1	43.45000	42.78000	43.42553	42.76200	0.2	-2
27.03.18	02:07:11.2	43.45000	42.78000	43.41094	42.76651	0.4	-6
27.03.18	03:28:22.1	43.47000	42.77000	43.44199	42.76326	1.1	-18
27.03.18	05:12:28.8	43.45000	42.78000	43.41715	42.76751	0.1	-2
27.03.18	05:43:00.3	43.43000	42.79000	43.41045	42.77640	0.4	-2
27.03.18	13:31:37.4	43.44000	42.78000	43.41356	42.76223	0.7	-5
27.03.18	18:58:07.1	43.40000	42.73800	43.41075	42.76252	1.2	-4
30.03.18	08:40:03.0	43.46000	42.77000	43.42104	42.77007	0.8	-8
30.03.18	08:44:33.6	43.45000	42.81000	43.42683	42.77252	1.2	-16

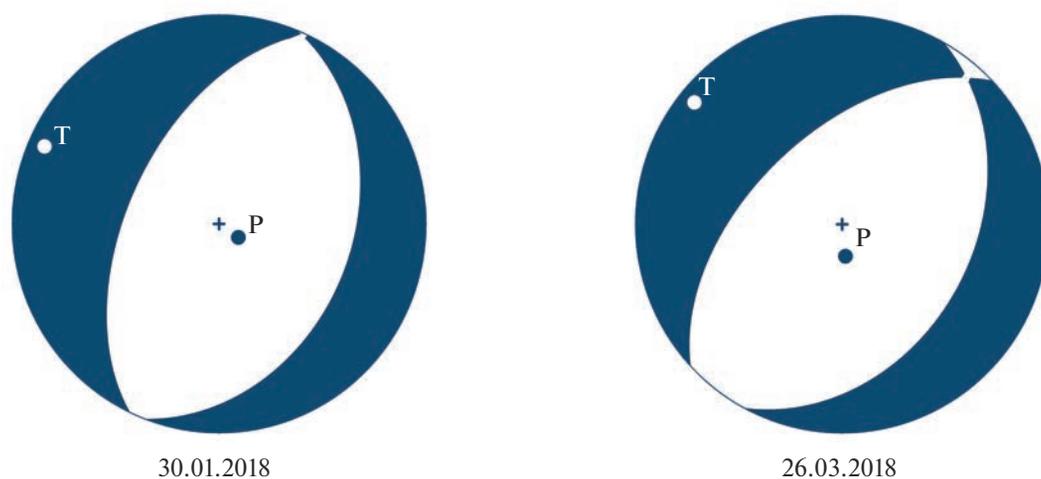


Рис. 6. Фокальные механизмы очагов землетрясений 30.01.2018 в 18<sup>h</sup>21<sup>m</sup> и 26.03.2018 в 17<sup>h</sup>37<sup>m</sup>.

2002]. На карте эта область показана отдельным условным слоем (область V в обозначениях).

Для исследования распределения роевых землетрясений по глубине построен разрез вдоль А–В на рис. 4б (прямоугольная штриховая область). Как видно на рис. 5, гипоцентры в основном рассеяны в слое от 0 до 10 км. При этом источник генерации сейсмических толчков располагался на глубинах 2–5 км, где наблюдается наибольшая плотность событий.

### МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для наиболее сильных землетрясений из каждого роя в январе и марте были построены механизмы очагов в программе FA [Ландер, 2018] на основе знаков первых вступлений продольных *P*-волн по данным региональных сейсмических станций. Решения механизмов представлены на рис. 6, а полученные параметры – в табл. 2.

Согласно полученным решениям механизмов для землетрясений 30 января и 26 марта, движение в очаге в обоих случаях произошло под действием значительного превалирования близ горизонтальных сил растяжения, ориентированных в северо-западном направлении. Тип подвижки

по обеим плоскостям для землетрясения 30 января – чистый сброс. Тип движения по нодальной плоскости *NP1* для очага 26 марта представлен сбросом с элементами левостороннего сдвига, по нодальной плоскости *NP2* – сбросом с элементами правостороннего сдвига.

У обоих землетрясений установлен подобный тип движения в очаге, согласующийся с кинематикой Эльбрусско-Минераловодской зоны сбросо-сдвиговых нарушений, в пределах которой они локализовались.

### СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ФОРМ

Кроме пространственных параметров, показывающих принадлежность роевых землетрясений к одному очагу, идентичность их волновых форм и спектров на одной и той же станции является особенностью таких событий. Указанные закономерности неоднократно наблюдались для роевых процессов на Северном Кавказе [Войтова, Габсатарова, 2016; Габсатарова и др., 2019] и Байкальской рифтовой зоне [Солоненко и др., 1987].

Таблица 2. Параметры механизмов очагов землетрясений 30.01.2018 в 18<sup>h</sup>21<sup>m</sup> и 26.03.2018 в 17<sup>h</sup>37<sup>m</sup>

№	Дата	$t_0$ , ч мин с	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
			<i>T</i>		<i>P</i>		<i>N</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>		
			<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>
1	30.01	18 21 59.3	9	294	81	125	2	24	205	54	–88	22	36	–93
2	26.03	17 37 19.0	9	309	78	174	9	41	227	54	–79	29	37	–104

Сейсмический очаг и траектория распространения волн являются общими для всех событий роевых последовательностей. Различия в их волновых формах можно рассматривать как вклад характеристики среды, выраженный в изменении скорости распространения сейсмических волн. Повторяющиеся события в разное время (через неделю, месяц или даже несколько лет) в одной эпицентральной зоне имеют похожие волновые формы при их регистрации одной и той же станцией [Geller et al., 1980; Schaff, Beroza, 2004]. На сегодняшний день, принцип подобия сигналов, основанный на количественной оценке коэффициента взаимной корреляции волновых форм, используется в различных методиках для выявления и идентификации малоамплитудных сейсмических событий в массиве данных [Забодевкин и др., 2021; Schaff et al., 2010; Skoumal et al., 2014; Bobrov et al., 2014; Plenkers et al., 2013].

В работе, с целью установления подобия сигналов в роевых последовательностях ЭВЦ, были проанализированы сейсмические записи станций SHA1 (Шиджатмаз, расстояние 37 км) и DIGR (Дигорское ущелье, расстояние 88 км). По техническим причинам во время формирования второго роя ближайшая станция NEUR (Нейтрино), размещенная в 17 км южнее эпицентральной области, не работала, в связи с этим не представляется возможным провести детальный анализ записей по ней. Для анализа из каждого роя отбирались записи землетрясений, т.е. фрагменты волновых форм вертикальной компоненты, включающие *P* и *S* волны, которые имели различные энергетические характеристики и в которых отсутствовали наложения фаз. В процессе сравнения волновых форм, фильтрованных в диапазоне частот 1–10 Гц, были рассчитаны коэффициенты корреляции, показывающие меру схожести формы сейсмических сигналов. Сравнение записей внутри каждого роя показали высокие значения коэффициентов корреляции,  $R = 0.85–0.95 (\pm 0.01)$  для событий первого роя и  $R = 0.87–0.98 (\pm 0.01)$  для землетрясений второго роя. В качестве примера приведем иллюстрацию подобия волновых форм нескольких событий двух роев по станции SHA1 (рис. 7). На данном рисунке представлены нормированные амплитудные спектры, совмещенные по времени вступления волн. На выделенных 2-х секундных фрагментах записей четко видно подобие сигналов. Аналогичные решения получены по данным сейсмической станции DIGR.

Как было отмечено в работах [Войтова, Габсатарова, 2016; Габсатарова и др., 2019], близкие к единице значения коэффициентов корреляции и визуальное совпадение волновых форм землетрясений показывают высокую вероятность того, что

анализируемые события имеют подобные источники и пути распространения сейсмических волн.

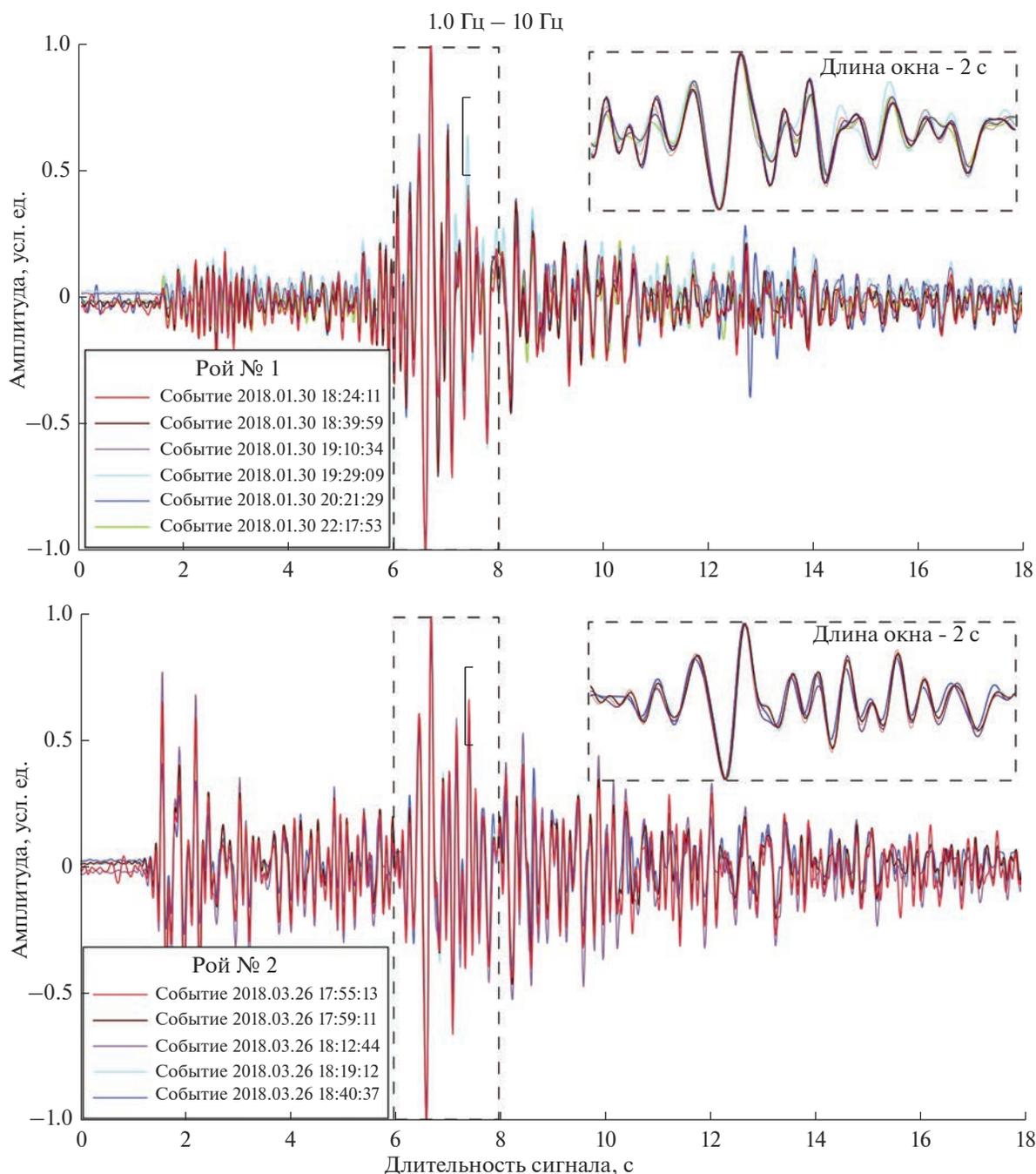
Спектральная плотность мощности, вычисленная для отобранных фрагментов, включающих землетрясения, в пределах полосы частот 1–10 Гц (рис. 8), также показывает высокую идентичность, указывающую на то, что рассмотренные сигналы возникли от одного источника. Анализ записей и спектров указывает на генетическое подобие их в пределах одного роя и отличие в разных роях.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сейсмические рои в тектонически активных регионах часто состоят из повторяющихся всплесков сейсмичности, которые высвобождают в сложной и неупорядоченной структуре лишь небольшую часть энергии деформации, накопленной тектоническими напряжениями [Hardebeck et al., 2008; Wu et al., 2014].

Возникновение роев землетрясений в вулканических и тектонических структурах обычно считается вызванным внешними силами. Наиболее распространенными из них являются асейсмические и локальные переходные процессы, такие как ползучесть, медленное скольжение, магматические интрузии и перераспределение флюидов. В большинстве случаев рои землетрясений связаны с миграцией магмы и активностью геотермальных флюидов [Shelly et al., 2016]. Также, некоторые исследователи связывают роевую последовательность с диффузией расширяющейся жидкости [Nur, 1974] и с образованием зоны дилатансии. Благодаря точному анализу местоположения активности роя землетрясений можно изучить миграцию подземной магмы и процесс миграции флюидов в зоне разлома, а также использовать в качестве информации для исследований процессов зарождения, возникновения и развития этих землетрясений.

Из-за специфики изучаемого района: наличие крупных разломов и тектонических нарушений, а также подтвержденных магматической камеры и очага на глубинах 5–6 км и 25 км соответственно [Рогожин и др., 2018; Лиходеев и др., 2017], явление роеобразования на территории ЭВЦ можно рассматривать как процесс гидродинамический, связанный с движением флюидной массы, где последние, как было отмечено выше, играют важную роль в динамике смещения (скольжения) разлома. Эти роевые события, возможно, связаны с изменением напряженного состояния геологической среды из-за вулкано-тектонической активности.

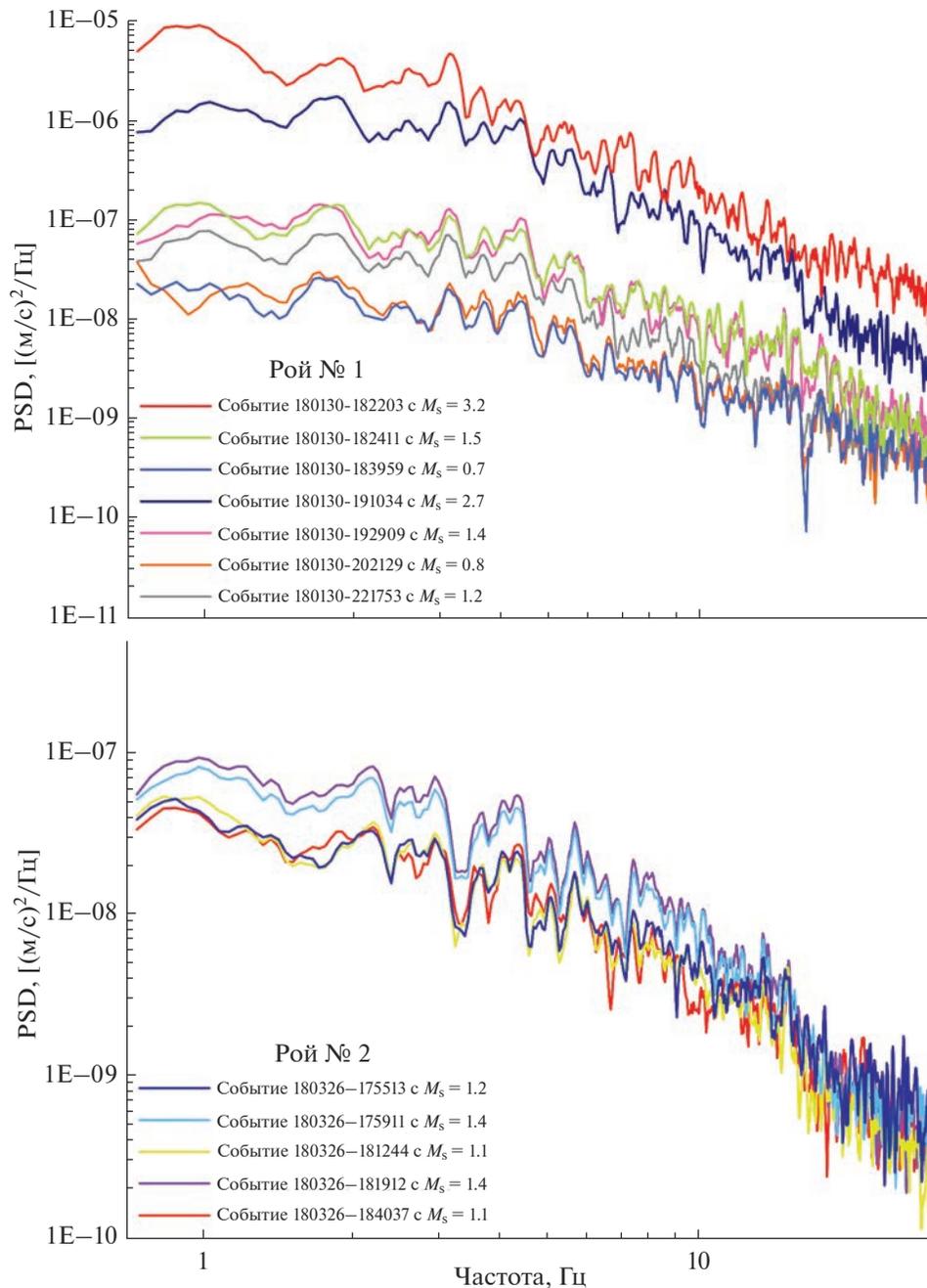


**Рис. 7.** Сравнение волновых форм землетрясений двух роев в районе ЭВЦ по данным сейсмической станции “Шиджатмаз” (SHA1). Записи отфильтрованы в диапазоне частот 1–10 Гц. Развернутые области шириной окна в 2 с соответствуют помеченным на записях фрагментам волновых форм.

Проведенный в данной работе анализ показывает, что зарегистрированные в разное время роевые землетрясения относятся к одному кластеру и решения механизмов дают основания полагать, что они приурочены к Эльбрусско-Минераловодской системе тектонических нарушений. Кинематика очаговой зоны роевых последователь-

ностей совпадает с современными тектоническими смещениями, где наблюдается движение земной коры в северо–северо-восточном направлении со скоростью 27–28 мм/год в отсчетной системе ITRF2014 [Милюков и др., 2015, 2022].

Высокая корреляция волновых форм по ближайшей станции и подобие спектральной плотно-



**Рис. 8.** Сравнение спектральной плотности мощности отдельных землетрясений роевых последовательностей по данным станции “Шиджатмаз” (SHA1).

сти мощности отдельных землетрясений роевых последовательностей показывают, что исследуемые события сгенерированы одним источником.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проявление роевых процессов в районе Эльбрусского вулканического центра заставляет

взглянуть по-новому на обстоятельства и говорит о необходимости расширения инструментальных сейсмологических наблюдений непосредственно на вулканической постройке и в ее ближайших окрестностях, так как такие явления возникают в эпицентральной зоне будущего сильного землетрясения за 10–15 лет до толчка, импульсивно появляются и исчезают [Чалова, Литовченко, 2015]. На Северном Кавказе подобные слабые роевые

землетрясения, предваряющие относительно сильное событие, отмечались неоднократно в пределах структур Кавказских Минеральных Вод и Терско-Каспийского прогиба [Габсатарова, 2007, 2008; Габсатарова и др., 2008].

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

### АВТОРСКИЙ ВКЛАД И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и пожелания, которые позволили существенно повысить качество статьи.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов А.П., Красилов С.А.* Программный комплекс WSG “Система обработки сейсмических данных” // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020664678 от 16 ноября 2020 г.
- Арбузкин В.Н., Компаниец М.А., Швец А.И. и др.* Отчет о комплексных геолого-геофизических исследованиях по Приэльбрусскому профилю. Ессентуки: ФГУП “Кавказгеолсъемка”, 2002. 120 с.
- Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В.* Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 27–40. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.02>
- Асминг В.Э.* LOS. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021665940 от 05.10.2021 г.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г.* База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
- Богатиков О.А., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л.* Использование космических технологий для мониторинга геологических структур вулкана Эльбрус // ДАН. 2002. Т. 387. № 3. С. 244–247.
- Богатиков О.А., Гурбанов А.Г., Газеев В.М.* Активный вулкан Эльбрус и этапы его геологической истории // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. Т. 1. Вулканизм. М.: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. С. 291–320.
- Войтова А.С., Габсатарова И.П.* Исследование слабых роев в 2016 г. в районе Сочи и Красной поляны // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск, 2016. С. 98–102.
- Габсатарова И.П.* Северный Кавказ // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. Обнинск: ГС РАН, 2007. С. 105–119.
- Габсатарова И.П., Девяткина Л.В., Селиванова Е.А.* Северный Кавказ // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 103–127.
- Габсатарова И.П.* Исследование пространственно-временных особенностей сейсмичности на Северном Кавказе / Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 2010. 23 с.
- Габсатарова И.П., Даниялов М.Г., Мехрюшев Д.Ю. и др.* Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Северный Кавказ // Землетрясения России в 2017 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 17–23.
- Габсатарова И.П., Пономарева Н.Л., Королецки Л.Н., Ахмедова М.М.* Гагатлинский рой слабых землетрясений – проявление активности Андийского разлома // Российский сейсмологический журнал. 2019. Т. 1. № 1. С. 46–56.
- Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Пономарева Н.Л., Каменская О.П.* Сравнительные характеристики волновых форм роев землетрясений в Дагестане в 2019 // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 31.
- Гаретовская И.В., Краснопевцева Г.В., Сизов А.В. и др.* Изучение глубинного строения Северо-Кавказской сейсмической зоны с помощью сейсмических и гравиметрических методов (Кавказские Минеральные Воды и Приэльбрусье) // Основные проблемы сейсмо-тектоники. М.: Наука, 1986. С. 105–119.
- Годзевич Б.Л.* Геологическое строение и история развития гор Пятигорья // Вестник Ставропольского государственного университета. 2002. № 31. С. 110–120.
- Горбатов А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю. и др.* Модель глубинного строения вулкана Эльбрус в свете новых геофизических данных // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480. № 2. С. 229–232.
- Дударов З.И., Лиходеев Д.В., Жостков Р.А. и др.* Глубинное строение вулкана Эльбрус // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 135–139.
- Заводевкин И.А., Шакирова А.А., Фирстов П.П.* Программное решение “Drumcong” на основе кросс-корреляционного анализа для выделения землетрясений с близкими волновыми формами // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактив-

- ных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 2021. С. 392–395.
- Землетрясения России. Пополняемая база данных ФИЦ ЕГС РАН. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620591 от 07 апреля 2015 г.
- Карта разломов территории СССР и сопредельных стран. Масштаб 1 : 2500000 / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Министерство геологии СССР, ВНИИ-Геофизика, 1980.
- Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций “Пулково” и “Екатеринбург”. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 77–83.
- Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Шевченко В.И. Новая интерпретация данных ГСЗ по профилю Степное–Бакуриани на Кавказе // Советская геология. 1970. № 8. С. 113–120.
- Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1984. 108 с.
- Ландер А.В. Программа расчета и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн (FA) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662004 от 25 сентября 2018 г.
- Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А. и др. Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 28–32.
- Маловичко А.А., Мехрюшев Д.Ю., Горожанцев С.В., Шевченко А.В. Новая сейсмическая станция на территории Кабардино-Балкарии // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 1. С. 68–74.
- Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Каширгова Р.Р., Долов С.М. Современное состояние сейсмического мониторинга в Кабардино-Балкарии // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 4. С. 5–22.
- Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В. и др. Развитие системы разномасштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 4. С. 47–57.
- Маловичко А.А., Шулаков Д.Ю., Дударов З.И., Долов С.М. Мониторинг сейсмичности Эльбрусского вулканического центра по данным локальной группы “Нейтрино” // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 213–216.
- Масуренков Ю.П. Кайнозойский вулканизм Эльбрусской вулканической области // Труды ИГЕМ АН СССР. Вып. 51. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 132 с.
- Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Комкова Л.А., Лаверова Н.И. Флюидно-магматические системы Северного Кавказа. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2010. 280 с.
- Милановский Е.Е., Короновский Н.В. Геологическое строение и история формирования вулкана Эльбрус // Тр. ВАГТ. Вып. 6. М.: Госгеолтехиздат, 1960. С. 92–127.
- Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968, 484 с.
- Милуков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценка скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям // Геотектоника. 2015. № 3. С. 56.
- Милуков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н. и др. Современные тектонические движения Западного Кавказа и Предкавказья по ГНСС наблюдениям // Геотектоника. 2022. № 1. С. 51–67.
- Мясников А.В., Милуков В.К. Состояние и динамика магматических камер вулкана Эльбрус по результатам деформографических наблюдений // Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе. 2015. С. 137–144.
- Мясников А.В., Милуков В.К. Оценка параметров магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций Баксанским лазерным интерферометром-деформографом // Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы докладов IV-й Всероссийской конференции с международным участием. М., 2017. С. 65–66.
- Мясников А.В., Милуков В.К. Новая резонансная магматическая структура в районе Эльбрусского вулканического центра // Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории Северной Евразии. Материалы международной конференции. Обнинск, 2017. С. 55.
- Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л. Новые технологии мониторинга внутренней структуры вулканов (магматического очага и магматических камер) // Вестник Владикавказского научного центра. 2007. Т. 7. № 4. С. 29–35.
- Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность: дистанционное изучение внутреннего строения литосферы / Под ред. академика А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с.
- Никонов А.А. Палеосейсмодислокации в приосевой части Главного кавказского хребта (Приэльбрусье) // Доклады АН СССР. 1991. Т. 319. № 5. С. 1183.
- Погода Э.В., Багаева С.С., Саяпина А.А. Регистрационные возможности сети сейсмологических наблюдений Северо-Осетинского филиала ГС РАН // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 257–259.
- Погода Э.В., Дмитриева И.Ю. Шумы, регистрируемые сейсмостанцией “Владикавказ” // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 260–262.
- Погода Э.В., Дмитриева И.Ю., Пятунин М.С. Исследование спектральных характеристик сейсмических шумов на сейсмостанциях республики Северная Осетия–

- Алания // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 263–267.
- Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: ИФЗ АН СССР, 1960. С. 75–114.
- Раутиан Т.Г.* Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. М.: Наука, 1964. С. 88–93. (Тр. ИФЗ АН СССР. № 32(199))
- Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г., Мараханов А.В. и др.* О соотношении проявлений вулканизма и землетрясений на северном Кавказе в голоцене // Физика Земли. 2005. № 3. С. 33–46.
- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И. и др.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
- Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Горбатилов А.В.* Глубинное строение и режим вулканической и сейсмической активности Приэльбрусья // Геотектоника. 2018. № 6. С. 69–81.
- Собисевич А.Л., Руденко О.В.* О резонансных свойствах магматических структур // Акустический журн. 2005. Т. 51. № 7. С. 169–176.
- Собисевич А.Л.* Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 1. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2012. 512 с.
- Солоненко Н.В., Солоненко А.В.* Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1987. 93 с.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1 : 8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах. М.: ИФЗ РАН, 1999. 57 с.
- Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др.* Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах // Инженерные изыскания в строительстве. 2016. № 7. С. 49–121.
- Хитаров Н.И., Шукин Ю.К., Сизов А.В.* К оценке активности вулкана Эльбрус // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. № 4. С. 952–954.
- Чалова В.С., Литовченко И.Н.* Применение алгоритма распознавания роевых последовательностей землетрясений в сейсмоактивном регионе северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле земли, интерпретация геофизических полей. Материалы конференции. Екатеринбург, 2015. С. 358–362.
- Юров Ю.Г.* Строение земной коры на Кавказе и изостазия // Советская геология. 1963. № 9. С. 42–47.
- Bobrov D., Kitov I., Zerbo L.* Perspectives of Cross-Correlation in Seismic Monitoring at the International Data Centre // Pure and Applied Geophysics. 2014. V. 171. P. 439–468. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0626-x>
- Draper N.R., Smith H.* Applied Regression Analysis. N. Y.: John Wiley & Sons, 1966. 407 p.
- Geller R.J., Mueller C.S.* Four Similar Earthquakes in Central California // Geophys. Res. Lett. 1980. V. 7. Iss. 10. P. 821–824. <https://doi.org/10.1029/GL007i010p00821>
- Hardebeck J.L., Felzer K.R., Michael A.J.* Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 113. B08310. <https://doi.org/10.1029/2007JB005410>
- Kværna T., Ringdal F.* Generalized Beamforming, Phase Association and Threshold Monitoring using a Global Seismic Network / Eds E.S. Husebye, A.M. Dainty // Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. NATO ASI Series. V. 303. Dordrecht: Springer, 1996. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0419-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0419-7_24)
- Lee W.H.K., Valdes C.M.* HYP071PC: A personal computer version of the HYP071 earthquake location program // U.S. Geological Survey Open File Report 85–749. 1985. 43 p.
- Malovichko A.A., Shulakov D.Y., Dudarov Z.I., Dolov S.M.* The Results of the Local Seismic Monitoring in the Underground Baksan Neutrino Observatory // International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI-2017). 2017. S02-6-02. P. 629.
- Nur A.* Matsushiro, Japan, earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model // Geology. 1974. V. 2. № 5. P. 217–221.
- Peterson J.* Observation and modeling of seismic background noise // U.S. Department of Interior, Geological Survey. Open-File Report 93–322. 1993. 95 p.
- Plenkens K., Ritter J.R.R., Schindler M.* Low Signal-to-Noise Event Detection Based on Waveform Stacking and Cross-Correlation: Application to a Stimulation Experiment // Journal of Seismology. 2013. V. 17. Iss. 1. P. 27–49. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9284-9>
- Schaff D.P., Beroza G.C.* Coseismic and Postseismic Velocity Changes Measured by Repeating Earthquakes // J. of Geophys. Res. 2004. V. 109. B10302. <https://doi.org/10.1029/2004JB003011>
- Schaff D.P., Waldhauser F.* One Magnitude Unit Reduction in Detection Threshold by Cross Correlation Applied to Parkfield (California) and China Seismicity // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100. № 6. P. 3224–3238. <https://doi.org/10.1785/0120100042100>
- Shelly D.R., Ellsworth W.L., Hill D.P.* Fluid – faulting evolution in high definition: Connecting fault structure and frequency-magnitude variations during the 2014 Long Valley Caldera, California, earthquake swarm // J. of Geophys. Res.: Solid Earth. 2016. V. 121. № 3. P. 1776–1795.
- Skoumal R.J., Brudzinski M.R., Currie B.S., Levy J.* Optimizing Multi-Station Earthquake Template Matching Through Re-Examination of the Youngstown, Ohio, Sequence // Earth and Planet. Sci. Lett. 2014. V. 405. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.033>
- Wu C., Meng X., Peng Z., Ben-Zion Y.* Lack of spatiotemporal localization of foreshocks before the 1999  $M_w$  7.1 Düzce, Turkey, earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. 2014. V. 104. № 1. P. 560–566. <https://doi.org/10.1785/0120130140>

## Analysis of Swarm Earthquakes on the Territory of the Elbrus Volcanic Center

Z. I. Dudarov<sup>1, \*</sup>, I. Yu. Dmitrieva<sup>2, \*\*</sup>, A. A. Sayapina<sup>2, \*\*</sup>, and S. S. Bagaeva<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Lenina prosp., 189, Obninsk, Kaluga Region, 249035 Russia*

<sup>2</sup>*North Ossetian Branch of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences,  
Markova str., 93a, Vladikavkaz, RSO-Alania, 362002 Russia*

*\*e-mail: zalim-dudar@yandex.ru*

*\*\*e-mail: sofgsras@gmail.com*

The paper presents the results of the analysis of swarm seismic events recorded in 2018 in the area of the Elbrus volcanic center by the North Caucasian seismological network of the FRC GS RAS. The standard method of station processing shows the hypocenters of recorded events in the area of the Elbrus volcanic center. The hypocenters of seismic events in swarm sequences were refined using the LOS software package, a complex combined location algorithm, methods of minimizing the time discrepancy in the source and grid search with depth enumeration. The described approach improves the reliability of location due to accounting for inaccuracies associated with incorrectly taken times of phase arrivals and minor deviations in travel times, depending on the velocity model of the medium used. According to the results of the study of the focal mechanisms of the strongest earthquakes, the type of movement was established, which is consistent with the kinematics of the Elbrus-Mineralnye Vody fault zone. Correlation analysis of the waveforms of the vertical component filtered in the frequency range of 1–10 Hz, including *P* and *S* waves, for the nearest station shows a high coincidence of the analyzed data (correlation coefficient  $R \geq 0.85$ ), which indicates a high probability that events have similar sources and paths propagation of seismic waves. Comparison of the power spectral density of individual earthquakes in swarm sequences also demonstrates high similarity.

*Keywords:* seismic event, earthquake, swarm, Elbrus volcanic center, fault, Elbrus volcano