УДК 550.34:551.243:528 DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20904

СПУТНИКОВЫЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЗОНЫ ВЛАДИКАВКАЗСКОГО АКТИВНОГО РАЗЛОМА

© 2016 Е.А. Рогожин^{1,3}, д.ф.-м.н., проф., В.К. Милюков², д.ф.-м.н.

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: eurog@ifz.ru;

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Россия, 119234, г. Москва, Университетский пр., д. 13, e-mail: milyukov@sai.msu.ru;

³Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Суммированы первые результаты геодезических наблюдений, выполненных развернутой около года назад локальной сетью приборов GPS. Выявлено, что зона Владикавказского разлома демонстрирует полную пассивность в поле современных горизонтальных движений. Кроме того эта зона сейсмоактивного в недавнем прошлом разлома уже на протяжении нескольких десятков лет не активна даже на уровне умеренных сейсмических событий. Исключением является слабое Хаталдонское землетрясение 2008 г., произошедшее в пределах Владикавказского разлома. В связи с этим зону разлома можно рассматривать как структуру, находящуюся сейчас в обстановке сейсмического затишья, и в будущем способную генерировать сильное землетрясение.

Ключевые слова: геодезические наблюдения, взброс, Владикавказский разлом, сейсмические события, полигон, Большой Кавказ, надвиг, макросейсмическое обследование, горизонтальные движения.

Изучение современных горизонтальных движений

Для изучения современных движений земной коры в зоне Владикавказского глубинного разлома в 2014–2015 гг. создан геодезический полигон из пунктов ГНСС наблюдений. На пунктах проведены измерения и получены первые оценки скоростей, свидетельствующие о согласованности коровых движений во Владикавказской разломной зоне с Осетинским регионом в целом в системе ITRF2008. Первые результаты показали, что скорости и направления горизонтальных движений не изменяются при пересечении зоны разлома (рис. 1). В соответствии с северо-восточной ориентировкой направления смещений пунктов и близширотным простирание дизьюнктивной зоны следует предполагать наличие левосторонних сдвиговых подвижек по ветвям активного разлома. Однако никаких свидетельств активизации движений в зоне разлома не наблюдается. Кроме того, в пределах высокомагнитудной Владикавказской сейсмогенерирующей зоны, связанной с этим разломом, уже на протяжении 25 лет не наблюдается проявлений даже слабой сейсмичности (за исключением Хаталдонского землетрясения с $K_p = 10,2$ от 11 мая 2008 г.). Все это



свидетельствует о пассивном состоянии этой одной из крупнейших дизъюнктивных структур Северного Кавказа в настоящее время (рис. 2).

Рис. 1. Горизонтальные скорости движения с погрешностью 1 о пунктов геодезической сети Владикавказского разлома и станций VLKK, LATZ в системе ITRF2008



Рис. 2. Эпицентры землетрясений разных магнитуд, зарегистрированных сетью сейсмостанций Геофизической службы РАН в период с 1991 по 2016 гг. в Осетинском секторе Большого Кавказа. Черным прямоугольником обозначена изученная зона Владикавказского разлома. Розовая ломаная линия – южная граница Республики Северная Осетия-Алания.

Сейсмологическое и сейсмотектоническое изучение Хаталдонского землетрясения

Хаталдонское землетрясение с $K_P = 10,2$ произошло 11 мая 2008 г. в 10^h57^m в центральной части территории Республики Северная Осетия-Алания [Габсатарова и др., 2015; Старовойт и др., 2015]. Механизм очага этого землетрясения (рис. 3) построен по знакам первого движения в *P*-волне на 17 станциях, удаленных на расстояния от 16 до 272 км и расположенных в трех квадрантах относительно эпицентра. Движение в очаге произошло под действием преобладающих сил сжатия, направленных с юго-востока. Подвижка по обеим нодальным плоскостям – типа взброс: по крутой ($DP_2 = 71^\circ$) плоскости NP2 – с элементами правостороннего сдвига, по пологой ($DP_1 = 24^\circ$) плоскости NP1 – надвиг.



Рис. 3. Диаграмма механизма очага землетрясения 11 мая 2008 г.

Макросейсмические сведения собраны сотрудниками Северо-Осетинского филиала ГС РАН. Землетрясение 11 мая в 10^h57^m явилось самым значительным из ощутимых землетрясений на территории Северной Осетии–Алании в двухтысячных годах [Габсатарова и др., 2015; Старовойт и др., 2015].

Максимальная интенсивность сотрясений равна $I_0 = 4$ балла. Карта изосейст этого землетрясения приведена на рис. 4.



Рис. 4. Карта пунктов-баллов и фрагменты предполагаемых изосейст землетрясения 11 мая 2008 г. с K_P = 10,2

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64; 2 – инструментальный эпицентр

Все три изосейсты из-за малого числа населенных пунктов приближенные, что связано с небольшой энергией главного толчка, всего $K_{\rm P} = 10,2$. Но, тем не менее, вытянутость изосейст разная: близширотная для I = 4 балла и близмеридиональная для I = 3 и 2 балла. При этом изосейста высшего балла согласуется с близширотным

Владикавказским разломом, тогда как система из двух оставшихся изосейст с I = 3 и 2 балла вытянута в близмеридиональном направлении и явного разлома в этом направлении нет.

Однако простирание нодальных плоскостей механизма очага (рис. 3) и вытянутость изосейст с I = 3 и 2 балла (рис. 4) не согласуются с простиранием Владикавказского разлома, что говорит о вероятной связи очага с движениями вдоль не ярко выраженного на поверхности регионального разлома, простирающегося почти перпендикулярно глубинному Владикавказскому разлому. Такой разлом выделяется по неотектоническим данным на «Карте глубинной тектоники юга Европейской части СССР и сопредельных стран» [Карта..., 1975] и протягивается с территории Южной Осетии на север почти до пос. Ардон в Северной Осетии. Однако с Владикавказским разломом согласуется изосейста с I = 4 балла, правда ее положение зафиксировано только по двум пунктам.

Эпицентральная область Хаталдонского землетрясения 11 мая 2008 г. приурочена к зоне Владикавказского глубинного разлома. Эта зона представляет собой региональную границу между альпийским складчато-глыбовым сооружением Большого Кавказа и Предкавказским прогибом (Осетинской впадиной). В верхних горизонтах осадочного чехла зоне разлома соответсвует крупнейшая региональная флексурно-разрывная система нарушений в породах палеогена и миоцена и в плиоцен-четвертичных слоях [Письменный и др., 2006]. В поле горизонтальних градиентов силы тяжести граница между Большим Кавказом и Осетинской впадиной характеризуется аномально высокими значениями горизонтальних градиентов, т.е. региональной гравитационной ступенью. По данным расчетов, приповерхностной части ступени соответствует расслоенная вертикальная флексура с размахом смыкающего крыла до 10 км и углом падения $DP = 65-70^\circ$, прослеживаемая до глубин 5–6 км. Предполагается, что поверхность фундамента в районе Владикавказского разлома смещена на до 5–6 км [Письменный и др., 2006].

Деформации позднеплейстоцен-голоценовых террас, связанные с тремя ветвями Владикавказской зоны, впервые были детально описаны Е.Е. Милановским [Милановский, 1968] почти полвека тому назад. Позднее, разлом появился на карте разломов СССР и сопредельных территорий [Карта разломов..., 1978]. В итоге, согласно линеаментно-доменно-фокальной модели, разработанной для создания нормативных карт ОСР-97, зона Владикавказского разлома представлена в качестве сейсмолинеамента с $M_{\text{max}} = 6,5$ [Уломов, Шумилина, 1999]. По данным внерегионального сейсмотектонического метода, основанного на кластерном анализе комплекса геолого-геофизических данных, максимальный сейсмический потенциал этой зоны на разных отрезках был определен как $M_{\text{max}} = 6,5-7,1$ [Рогожин и др., 2001].

В результате этих и других исследований было установлено, что зона Владикавказского разлома представляет собой потенциально опасную в сейсмической отношении неоднородность земной коры. В процессе полевых работ 2007–2009 гг., проведенных сотрудниками ИФЗ РАН, приповерхностное строение разломной зоны было изучено геолого-геоморфологическими методами. Глубинное строение исследовано методом низкочастотного микросейсмического зондирования.

Все три ветви зоны разлома выражены в смещениях молодых террасовых уровней и слагающих их осадков. Кроме этого, с двумя южными вервями связаны многочисленные блок-оползни, следы древних подпруженных озер и перехватов речных долин. Северная ветвь Владикавказской разломной зоны на поверхности выражена уступом, секущим все осадки молодого комплекса обложений предгорий Большого Кавказа. Максимальную высоту (до 8 м) уступ имеет на поверхности позднеплейстоценовых 5-ой и 6-ой террас. В пользу проявлений активизации разломной зоны в прошлом именно в сейсмической форме свидетельствуют разрывные смещения молодых отложений, а также коллювиальные клинья и погребенные слои палеопочв в опущеннях крыльях разрывов, изученные в специально пройденных горных выработках. Амплитуда одноактного, вероятно сейсмотектонического вертикального смещения, по северной ветви Владикавказской разломной зоны достигает 40 см (точка 7 на рис. 5).



Рис. 5.Положение ветвей Владикавказской разломной зоны на карте рельефа исследуемого региона

(сечение изолиний рельефа – 30 м) [Овсюченко и др., 2011]

1 – активные взбросы (бергштрихи направлены в сторону поднятого крыла);

2 – предположительно активные разломы (сдвиги); 3 – точки геолого-геоморфологических наблюдений; 4 – точки микросейсмического зондирования, выполненного вдоль профилей VL 1 (Владикавказ), VL 2 (Алагир); АБ – линия, по которой построен разрез, представленный на рис. 6.





1 – аллювиальные отложения; 2 – пачка грубообломочных отложений с суглинистым матриксом;
3 – конгломераты свиты Рухс-Дзуар (плиоцен–средний плейстоцен); 4 – разрывы, установленные
в неоген-четвертичных отложениях. На вертикальной оси – абсолютные отметки рельефа (h, м);
на горизонтальной – расстояние от южного конца профиля (R, км).

В зонах средней и южной вервей вертикальне амплитуды сейсмотектонических смещений также не превышают 40 см (т. 3, т. 5, т. 6 на рис. 5). Используя статистические соотношения магнитуды землетрясений с размерами зон распространения одновозрастных сейсмодислокаций, амплитудами импульсных, сейсмотектонических смещений, и их кинематикой [Wells, Coppersmith, 1994], можно предположить, что магнитуды породивших эти палеосейсмодислокации сейсмических событий составляли 6,5–6,7.

Таким образом, описанные деформации позволяют полагать, что в прошлом все ветви Владикавказской разломной зоны испытывали импульсные обновления, причиной чего являлись землетрясения. При этом помимо сейсморазрывов происходило образование и крупных, блокових оползней.

Полевые инструментальные исследования глубинной структуры зоны Владикавказского разлома методом низкочастотного микросейсмического зондирования включали в себя построение глубинных разрезов в параметрах относительных скоростей сейсмических *S*-волн вдоль двух профилей (рис. 7). Полученные в результате зондирования разрезы в параметрах относительных сейсмических скоростей (или сейсмических контрастов) представлены на рис. 7а,б. Тоновым изображением в поле рисунков представлено распределение относительных интенсивностей микросейсмического сигнала относительно базовой станции. В шкале, приведенной справа на рисунке, указано, какому тону соответствует максимальное и минимальное значение скоростей сейсмических волн. Абсолютные значения скоростей при этом не определяются. Пунктирными линиями на поверхности показаны активне разрывы Владикавказской разломной зоны по результатам изучения геологическими методами.



Рис. 7. Результаты применения метода низкочастотного микросейсмического зондирования по профилям VL2, Алагир (а) и VL1, Владикавказ (б) (положение профилей см. на рис. 5)

Отрезки штриховых линий на верхних горизонтальных осях – активные разрывы, установленные по результатам геологических исследований. Над фрагментом а: рельеф в створе профиля (1) и вдоль долины реки (2).

Наиболее контрастными неоднородностями, выделенными на обох профилях микросейсмического зондирования, являются мощные субвертикальные зоны высоких контрастов скоростей поперечных волн. Интересно, что эти субвертикальные зоны прослеживаются до подошвы земной коры и ниже, в верхах мантии, а субгоризонтальное неоднородности микросейсмических разрезов резко обрываются в их пределах и не прослеживаются в противоположных блоках земной коры. В верхней части разреза, на глубинах 7–8 км и менее, выделяется несколько контрастных зон – две на Алагирском профиле и три на Владикавказском. На Владикавказском профиле, на глубине 15 км они объединяются в единую зону. На Алагирском профиле они прослеживаются разрозненно до подошвы земной коры. В мантию здесь проникает лиш центральная ветвь.

В приповерхностной части разрезов выделяемые неоднородности четко соответствуют разрывам в молодых отложениях, изученных геологическими методами. Если рассматривать зоны високих контрастов скоростей поперечних волн, выделенные по данням микросейсмического зондирования в качестве областей пониженной прочности, то разрывы в молодых осадках можно ассоциировать с зонами розгрузки глубинных напряжений в верхних горизонтах чехла. Наиболее контрастно такая зона проявлена в районе г. Алагир. Это позволяет провести сегментацию зоны Владикавказского разлома в целом, по степени ее современной активности. Наиболее активным является ее западный фланг, где и возникло Хаталдонское землетрясение.

Эпицентральная область Хаталдонского землетрясения 11 мая 2008 г. на описанном сейсмотектоническом фоне занимает четкую позицию в западной части зоны Владикавказского разлома (рис. 6). Овальная в плане изосейста 4-го балла располагается между северной и южной ветвями этой дизьюнктивной зоны. Учитывая глубину гипоцентра, по разным оценкам от 7 до 17 км, очаг мог располагаться в нижней части листрически погружающейся к северу южной ее ветви (рис. 7а).

Заключение

Первые результаты геодезических наблюдений, выполненныхразвернутой около года назад локальной сетью приборов GPS позволили установить, что зона Владикавказского разлома демонстрирует полную пассивность в поле современных горизонтальных движений. Кроме того эта зона сейсмоактивного в недавнем прошлом разлома уже на протяжении нескольких десятков лет не показывает проявлений даже умеренных сейсмических событий. Исключением является слабое Хаталдонское землетрясение 2008 г., произошедшее в пределах Владикавказского разлома. В связи с этим зону разлома можно рассматривать как структуру, находящуюся сейчас в обстановке сейсмического затишья, и в будущем способную генерировать сильное землетрясение.

Литература

1. Габсатарова И.П., Погода Э.В., Головкова Л.В. Хаталдонское землетрясение 11 мая 2008 г. с К_Р = 10,2, I₀ = 4 (Северная Осетия–Алания) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: издание ГС РАН, 2015. – С. 60–97.

2. Карта глубинной тектоники юга Европейской части СССР и сопредельных стран. М 1:1 000 000 / Мельников В.А., Мельников Ю.В., Москалёв Е.Л., Скарятин В.Д. / Под ред. Зембатова С.С., Кобленца Э.Л. и Цогоева В.Б. – Л.: ВСЕГЕИ, 1975.

3. Карта разломов территории СССР и сопредельных стран. Отв. Ред. А.В. Сидоренко. – 1978.

4. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. – М.: Недра, 1968. – 483 с.

5. Овсюченко А.Н., Горбатиков А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Ларин Н.В. Строение зоны Владикавказского разлома по результатам изучения комплексом геолого-геофизических методов // Геофизические исследования. – 2011. – 12. №4. – С. 47–57.

6. Письменный А.Н., Горбачев С.А., Вертий С.Н. и др. ГДП-200 в пределах восточного сегмента зоны Главного хребта Центрального Кавказа (листы К-38-IX, XV). – Ессентуки: ФГУГП «Кавказгеолсъемка», 2006.

7. Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами // Геофизика и математика XXI. Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – С. 279–299.

8. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.

9. Старовойт О.Е., Михайлова Р.С., Рогожин Е.А., Левина В.И. Северная Евразия // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: издание ГС РАН, 2015. – С. 14–40.

10. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length rupture width, rupture area, and surface displacement. // Bull. Seis. Soc. Am. -1994. - 84. - N4 - P.974-1002.

DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20904

SATELLITE GEODETIC MONITORING AND SEISMIC MANIFESTATIONS OF THE VLADIKAVKAZ ACTIVE BREAKING ZONE

© 2016 E.A. Rogozhin^{1,3}, Sc. Doctor (Geol.-Min.), prof., V.K. Milyukov², Sc. Doctor (Geol.-Min.), prof.

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Russia, 123995, Moscow, B. Gruzinskaya 10/1, e-mail: <u>eurog@ifz.ru;</u>

²M.V. Lomonosov Moscow State University, P.K. Sternberg State Astronomical Institute (SAI MSU), Russia, 119234, Moscow, Universitetsky avenue, 13, e-mail: <u>milyukov@sai.msu.ru;</u>

³Geophysical Institute of VSC RAS, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov street, 93a

The first results of the geodetic observations, performed by the local network of GPS created approximately one year ago are summarized. It is revealed, that the Vladikavkaz breaking zone demonstrates complete passiveness in the field of contemporary horizontal motions. Furthermore this recently seismoactive breaking zone is not already for a period several decades active even at the level of the moderate seismic events. Exception is the weak Khataldon earthquake 2008, which occurred in the limits of Vladikavkaz breaking. In connection with this the zone of breaking can be considered as structure, which is located now in the situation of seismic calm, and in the future capable of generating strong earthquake.

Keywords: geodetic monitoring, uplift, Vladikavkaz fracture, seismic events, polygon, the Greater Caucasus, overlap, makroseismic survey, horizontal movement.