

УДК 550.34:551.21

ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ МЕТОДИКИ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОГНОЗА ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

© 2018 г. В.А. Салтыков, Ю.А. Кугаенко, П.В. Воропаев

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
“Единая геофизическая служба РАН”, г. Петропавловск-Камчатский, Россия*

В конце 2016 г. начался очередной эпизод эруптивной активности вулкана Безымянный на Камчатке. Рассматриваются предвестниковые ситуации, выявленные по возрастанию уровня сейсмичности и проанализированные в реальном времени перед тремя извержениями вулкана в ноябре 2016 г. – марте 2017 г.

Применение формализованной методики вероятностного прогноза, разработанной для вулкана Безымянный В.А. Салтыковым по сейсмическим данным 1999–2014 гг., позволило сформулировать вероятностные прогнозы извержений в режиме реального времени, которые были переданы Камчатскому филиалу Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) и признаны оправдавшимися.

Ключевые слова: Камчатка, вулкан Безымянный, предвестник, прогноз, землетрясение, извержение.

Введение

В ноябре 2016 г. на Камчатке после более чем четырех лет покоя повысилась активность вулкана Безымянный. Особенности и хронология деятельности этого вулкана описаны в [Богоявленская и др., 1991; Гурина и др., 2017; Girina, 2013; West, 2013] и ряде других работ. Очередной эпизод активизации вулкана начался в первой декаде декабря 2016 г.; его кульминацией стало эксплозивное извержение 09.03.2017 г., в ходе которого облака вулканического пепла поднялись на высоту 7–8 км и образовался пепловый шлейф длиной в несколько сотен километров.

Большинство активизаций этого вулкана предварялось усилением малоглубинной сейсмичности, что позволило создать формализованную методику вероятностного прогноза (МВП) извержений вулкана Безымянный, детально описанную одним из авторов в [Салтыков, 2016]. Данная публикация представляет собой сообщение о первом применении этой методики в режиме реального времени в ходе развития эруптивной деятельности вулкана в конце 2016 – начале 2017 гг.

О методике вероятностного прогноза

Наиболее надежным источником информации для выявления потенциальной предвестниковой ситуации для вулкана Безымянный, по мнению авторов, является сейсмичность, непрерывные данные о которой обеспечиваются Камчатской системой сейсмического мониторинга. Эти данные доступны для анализа в реальном времени и не зависят от возможности проведения визуальных наблюдений, метеоусловий, прозрачности атмосферы, наличия спутников и т.д. По данным 1999–2012 гг. в большинстве случаев извержения предварялись статистически значимым повышением уровня

сейсмичности по шкале СОУС'09 [Салтыков, 2011] с заблаговременностью до 40 суток [Кугаенко, Воропаев, 2015].

В соответствии с современными требованиями к прогнозу опасных природных процессов методика обнаружения предвестника должна быть формализована; кроме того для оценки вероятности реализации прогноза среди параметров, анализируемых в рамках методики, должна присутствовать оценка эффективности предвестника.

В упоминаемой выше работе [Салтыков, 2016] предложен формализованный подход к вероятностному прогнозу на основе применения статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 и ряда вспомогательных функций, характеризующих предвестник. Для выявления временных участков подготовки извержения используется функция-индикатор $U(t)$ и пороговый критерий, позволившие формализовать процедуру выявления предвестника извержения. Принципиальным элементом методики являются оценка вероятности реализации прогноза в зависимости от продолжительности прогноза и величины порогового критерия.

В случае вулкана Безымянный анализируется сейсмичность на глубинах до 30 км в радиусе 6 км от его вершины. На основе данных 1999–2014 гг., в течение которых произошло 21 извержение, ретроспективно оценена надежность и достоверность предвестника, а также его эффективность. Результаты ретроспективного применения методики вероятностного прогноза статистически значимо отличаются от случайного угадывания и дают по сравнению с ним выигрыш в 3–30 раз.

Предвестниковые ситуации в ноябре 2016 г., январе–феврале и марте 2017 г.

Усиление сейсмичности, начавшееся в ноябре 2016 г., привело к росту вероятности извержения вулкана Безымянный. На рис. 1 приводятся параметры, характеризующие предвестниковые ситуации перед извержениями вулкана Безымянный в конце 2016 – начале 2017 г.

Параметр, называемый контрастностью (рис. 1, а), показывает, во сколько раз увеличивается вероятность прогнозируемого события при появлении предвестника (график 2) по сравнению с ситуацией, когда предвестник отсутствует (график 1). Методика ориентирована на расчет выделившейся сейсмической энергии, а не числа зарегистрированных на вулкане землетрясений (рис. 1, б). При сопоставлении рис. 1, а и рис. 1, б видно, что эти величины не всегда коррелируют – это является особенностью вулканических областей.

Ранее методика вероятностного прогноза не опробовалась в режиме реального времени, поэтому мониторинг функции-индикатора в 2016 г. проводился в экспериментальном “внутреннем” режиме. К тому же длительное (с сентября 2012 г.) отсутствие извержений позволяло предположить, что режим вулкана изменился и методика, разработанная для событий 1999–2012 гг., может оказаться неэффективной. Однако начавшееся извержение показало, что предложенный подход остается актуальным.

По данным *KVERT*¹, извержение началось 05.12.2016 г. (рис. 1, а) с экструзивной фазы I, на которой активизировалось выжимание лавового купола в кратере, перешедшей затем 12.12.2016 г. в эффузивную фазу II – на склон вулкана излился лавовый поток; 15.12.2016 г. было отмечено эксплозивное событие III – зафиксирован парогазовый шлейф с примесью пепла [Гирина и др., 2017; Чебров и др., 2017]. Извержение произошло, когда его вероятность по МВП примерно в 10 раз превышала среднемноголетнюю вероятность и более чем в 100 – вероятность извержения при отсутствии предвестника.

¹ Камчатская группа реагирования на вулканические извержения, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index.php>.

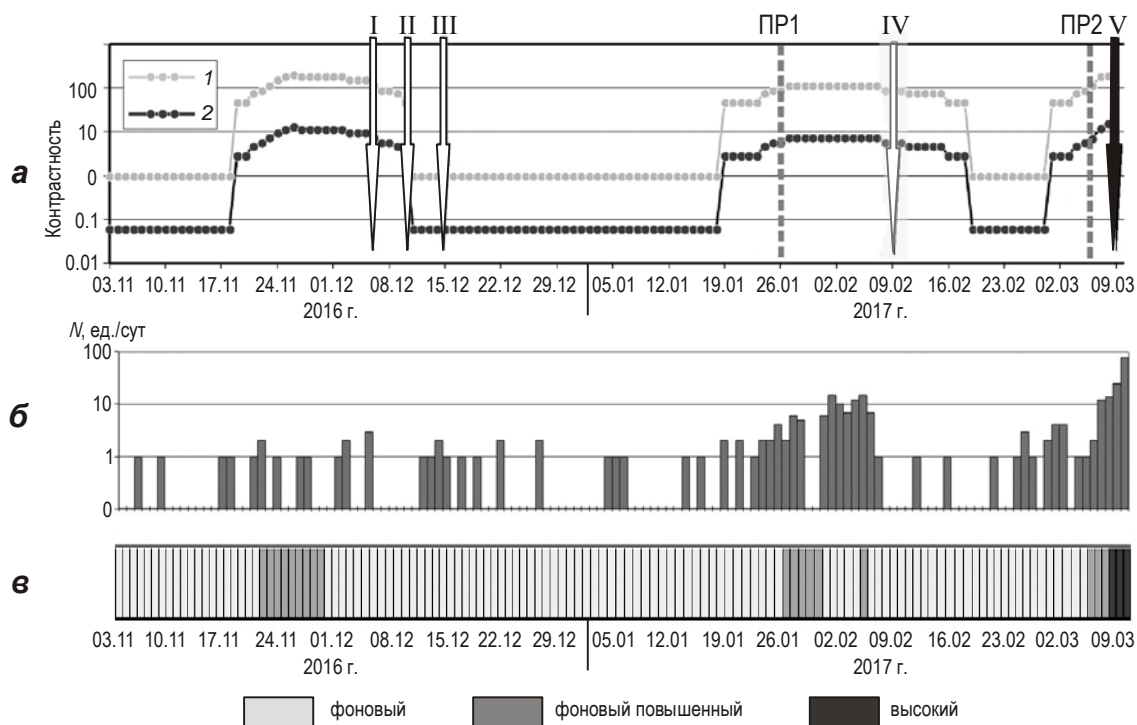


Рис. 1. Предвестниковые ситуации перед извержениями вулкана Безымянный в конце 2016 – начале 2017 гг.: *а* – отношение вероятности извержения вулкана при появлении предвестника к вероятности извержения в его отсутствие (1) и к среднемноголетней вероятности извержения (2); *б* – число землетрясений, зарегистрированных в радиусе 6 км от вершины вулкана в диапазоне глубин до 30 км; *в* – временной ход уровня сейсмичности по шкале СОУС’09 во временном окне 5 суток (значение привязано к правому краю окна)

Римскими цифрами на *а* обозначены последовательные фазы извержений: 2016 г. – экстремальная фаза (I), эффузивная фаза (II) и эксплозивное событие (III); 2017 г. – эффузивная фаза (IV) и эксплозивное извержение (V)

С учетом отмеченного выше следующая сейсмическая активизация, имевшая место в январе–феврале 2017 г., анализировалась в режиме реального времени. Прогнозные заключения о готовящемся извержении были переданы в КФ РЭС 26.01.2017 г. (PR1 на рис. 1, *а*) 03.02.2017 г. и 10.02.2017 г. Вероятность извержения превышала среднемноголетнюю примерно в 7 раз.

Из-за облачности, затруднявшей наземные и спутниковые наблюдения, невозможно было установить точную дату начала извержения – ориентировочно это случилось между 7 и 11 февраля [Гирин и др., 2017]. Начиная с 11.02.2017 г., видеокамеры КФ ФИЦ ЕГС РАН¹ фиксировали новый лавовый поток на склоне вулкана (рис. 2, *б*). Таким образом, прогноз оправдался и реализовался эффузивным извержением.

Сейсмическая активизация начала марта 2017 г. также была проанализирована в режиме реального времени. Сейсмичность вулкана (во временном окне 5 сут) вышла на фоновый повышенный уровень 04.03.2017 г. и 07.03.2017 г. перешла на высокий (см. рис. 1, *в*). Прогнозное заключение, сделанное на основе метода вероятного прогнозирования, было передано в КФ РЭС 06.03.2017 г., в момент, когда вероятность извержения превышала среднемноголетнюю примерно в 6 раз (PR2 на рис. 1, *а*).

¹ Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”.

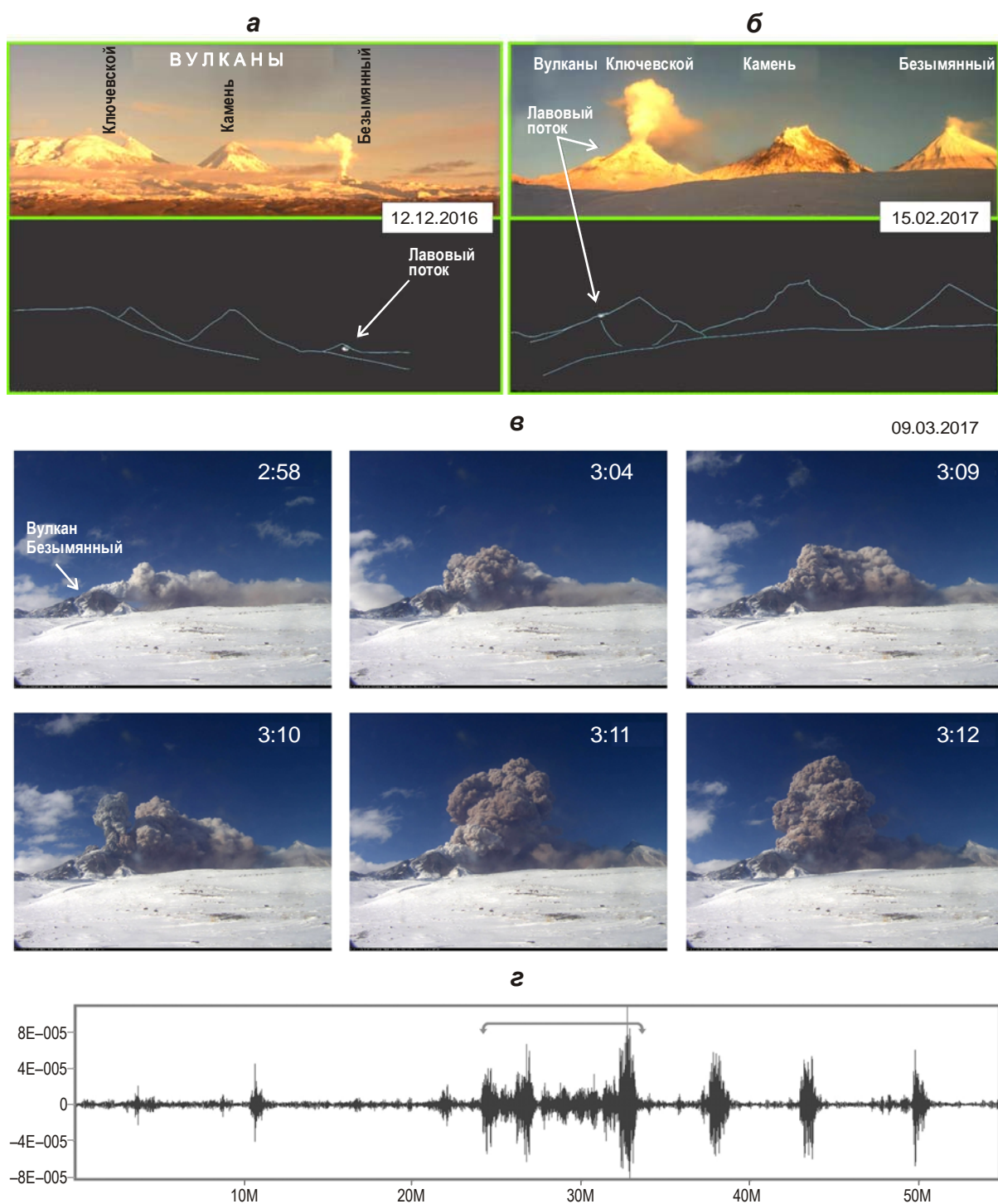


Рис. 2. Извержения вулкана Безымянный в конце 2016 г. – начале 2017 г. Дневная (вверху) и ночная (внизу) фотографии лавовых потоков, излившихся на склон вулкана 12.12.2016 г. (а, вид с запада) и 7–11.02.2017 г. (б, вид с востока), фрагменты видеосъемки 09.03.2017 г. (в) и сейсмическая запись эксплозивного извержения 09.03.2017 г. (г). Комментарии в тексте

В течение 07–08.03.2017 г. вероятность извержения продолжала расти и контрастность достигла значения ~ 16 . Прогноз реализовался живописным эксплозивным извержением 09.03.2017 г. (V на рис. 1, а), которое в условиях хорошей видимости было

зафиксировано видеокамерами (рис. 2, в). Анализ спутниковых снимков позволил определить время начала извержения – ~01:30 UTC [Гирина и др., 2017].

Пять наиболее сильных выбросов с подъемом пепловых облаков на высоту до 7–8 км происходили в течение примерно получаса, что хорошо видно на сейсмической записи, приводимой на рис. 2, г, где этот временной интервал обозначен скобкой. После эксплозий на склон вулкана стали поступать новые порции лавы и продолжалась интенсивная парогазовая деятельность. Затем вулкан Безымянный перешел в состояние умеренной эруптивной активности.

Три извержения вулкана Безымянный, которые произошли 05–11.12.2016 г., 08–10.02.2017 г. и 09.03.2017 г. и соответствуют единому эпизоду его активизации в ноябре 2016 г. – марте 2017 г., подтвердили работоспособность разработанной методики вероятностного прогноза, использующей энергетические параметры мелкофокусной сейсмичности, локализованной в радиусе 6 км от вершины вулкана.

Первый опыт применения методики вероятностного прогноза в режиме реального времени оказался успешным – прогнозы, сделанные на его основе и переданные в КФ РЭС, были признаны оправдавшимися.

Литература

- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Максимов А.П., Иванов Б.В. Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С.168–194.
- Гирина О.А., Мельников Д.В., Демянчук Ю.В., Маневич А.Г. Извержение вулкана Безымянный в 2016–2017 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. XX ежегодная научная конференция, посвященная дню вулканолога: Материалы конференции, Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 14–17.
- Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Вариации статистической оценки уровня сейсмичности по шкале СОУС'09: вулкан Безымянный // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 25. С.31–40.
- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С.53–59.
- Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. Т. 17, № 3. С.45–59.
- Чебров Д.В., Фирстов П.П., Сеньюков С.Л., Близнецов В.Е., Воропаев П.В., Гарбузова В.Т., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Кугаенко Ю.А., Назарова З.А., Нуждина И.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., Сероветников С.С., Соболевская О.В. Активность вулкана Безымянный (Камчатка) в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. 2017. № 1. Вып. 33. С. 5–11.
- Girina O.A. Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956–2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P.22–41.
- West M.E. Recent eruptions at Bezymianny volcano – a seismological comparison // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P.42–57.

Сведения об авторах

САЛТЫКОВ Вадим Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией сейсмического мониторинга, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: +7(961) 960-29-61. E-mail: salt@emsd.ru

КУГАЕНКО Юлия Александровна – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: +7(914) 629-69-31. E-mail: ku@emsd.ru

ВОРОПАЕВ Петр Валентинович – научный сотрудник, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: +7(415) 243-17-52. E-mail: chicoli@emsd.ru

THE FIRST REAL-TIME APPLICATION OF THE FORMALIZED TECHNIQUE FOR PROBABILISTIC FORECAST: BEZYMIANNY VOLCANO ERUPTIONS

V.A. Saltykov, Yu.A. Kugaenko, P.V. Voropaev

*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Abstract. The new episode of the eruptive activity of the Bezymianny Volcano in Kamchatka started in 2016. The article demonstrates the precursor situations identified by increasing the level of seismicity and analyzed in real time before three eruptions in November 2016 – March 2017. The application of the formalized forecasting technique developed for the Bezymianny Volcano using seismic data from 1999 to 2014 [Saltykov, 2016] allows the formulation of the probabilistic forecast of eruptions in real time.

Keywords: Kamchatka, Bezymianny Volcano, precursor, forecasting, earthquake, eruption.

References

- Bogoyavlenskaya G.Ye., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Maksimov A.P., and Ivanov B.V. Bezymianny Volcano, in *Active volcanoes of Kamchatka*, vol. 1, Moscow: Nauka, 1991, pp. 195-199.
- Chebrov D.V., Firstov P.P., Senyukov S.L., Bliznetsov V.Ye., Voropaev P.V., Garbuzova V.T., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu., Kugaenko Yu.A., Nazarova Z.A., Nuzhdina I.N., Saltykov V.A., Serafimova Yu.K., Serovetnikov S.S., Sobolevskaya O.V. Activity of Bezymianny Volcano (Kamchatka) in 2016-2017, *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle (Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”)*, 2017, is. 33, no. 1, pp. 5-11.
- Girina O.A. Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956–2010, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, vol. 263, pp. 22-41.
- Girina O.A., Melnikov D.V., Demyanchuk Yu.V., Manevich A.G. The eruption of Bezymianny Volcano in 2016–2017 according to KVERT. *Volcanism and related processes. XXth annual scientific conference dedicated to the day of the volcanologist. Conference materials*. Petropavlovsk-Kamchatsky, March 30-31, 2017. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2017. pp. 14-17.
- Kugaenko Yu.A. and Voropaev P.V. Seismicity level variations estimated statistically using SESL’09 technique: application for Bezymianny Volcano (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle (Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”)*, 2015, is. 25, no. 1, pp. 31-40.
- Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: the method and results of application to Kamchatka, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2011, vol. 5, pp. 123-128.
- Saltykov V.A. Formalized technique of Bezymianny volcano (Kamchatka) eruption forecasting based on the statistical estimation of seismicity level, *Geofizicheskie issledovaniya (Geophysical Research)*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 45-59. DOI: 10.21455/gr2016.3-4.
- West M.E. Recent eruptions at Bezymianny volcano – a seismological comparison, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, vol. 263, pp. 42-57.