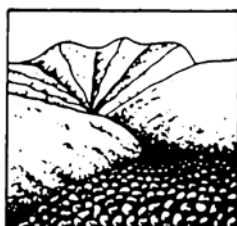


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



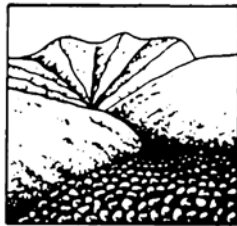
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2025

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 6-10 ოქტომბერი, 2025



რედაქტორები
ს. ს. ჩერნომორეც, გ. ვ. გავარდაშვილი, კ. ს. ვისხაჯიევა

შპს „გეომარკეტინგი“
მოსკოვი
2025

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2025. 496 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC, 2025. 496 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო. – პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა. – მოსკოვი: შპს „გეომარკეტინგი“, 2025. 496 ს.

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (M.V. Lomonosov Moscow State University), G.V. Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University), K.S. Viskhadzhieva (M.V. Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-5-6053539-4-2

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტი



Система мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока

А.А. Добрынина^{1,2,3}, В.А. Саньков^{1,2}, С.А. Король¹, Н.В. Кичигина⁴,
А.А. Рыбченко^{1,4}

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, dobrynina@crust.irk.ru

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
СО РАН, Иркутск, Россия

³Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

⁴Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. На основе анализа сейсмических шумов, генерируемых потоком воды в русле реки Кынгарга (Тункинская долина, Восточный Саян) в межень и во время прохождения паводков и селевого потока 2014 г., предложена система мониторинга и экстренного оповещения о начале движения накопленного каменного материала. Разработанная система представляет собой комплекс измерительного оборудования, контролирующего селеформирующие климатические условия, а также уровень и концентрацию твердой составляющей в водном/селевом потоке. Эффективность разработанной системы предупреждения основана на разнице скоростей селевого потока (в среднем 5–10 м/с) и скорости распространения сейсмических волн ($\approx 3,5$ км/с).

Ключевые слова: селевой поток, паводок, микросейсмические шумы, р. Кынгарга, Тункинская долина, система экстренного оповещения

Ссылка для цитирования: Добрынина А.А., Саньков В.А., Король С.А., Кичигина Н.В., Рыбченко А.А. Система мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 101–110.

Debris flow monitoring and emergency warning system

A.A. Dobrynina^{1,2,3}, V.A. Sankov^{1,2}, S.A. Korol¹, N.V. Kichigina⁴, A.A. Rybchenko^{1,4}

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia, dobrynina@crust.irk.ru

²Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

³Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Ulan-Ude, Russia

⁴V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Irkutsk, Russia

Abstract. Based on the analysis of seismic noise generated by a calm flow of water in the bed of the Kyngarga River (Tunka Valley, Eastern Sayan), as well as during the floods and debris flow of 2014, a system for monitoring and emergency warning of the beginning of the movement of accumulated rock material is proposed. The developed system is a set of measuring equipment that monitors debris flow forming climatic conditions, as well as the level and concentration of solid components in a water/debris flow. The effectiveness of the developed warning system is based on the differences in velocity of debris flow (on average 5–10 m/s) and seismic waves (≈ 3.5 km/s).



Key words: *debris flow, flood, ambient noise, Kyngarga river, Tunka Valley, emergency warning system*

Cite this article: Dobrynina A.A., Sankov V.A., Korol S.A., Kichigina N.V., Rybchenko A.A. Debris flow monitoring and emergency warning system. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 101–110.

Введение

Микросейсмические колебания, регистрируемые в земной коре, являются результатом взаимодействия геосфер (атмосфера, гидросфера и литосфера) и имеют различное происхождение – искусственное (антропогенный фактор) и природное (эндогенные и экзогенные процессы). Экзогенные источники микросейсмического шума очень разнообразны. В частности, сейсмическими станциями фиксируются такие экзогенные процессы, как смерчи, шквалы, грозы, торнадо, сход лавин, обвалы, оползни, сели и паводки [Ярошевич и др., 2016; Чечельницкий и др., 2018; Burjáněk et al., 2010; Guillemot et al., 2021; Del Gaudio et al., 2021; Dietze et al., 2022; Chmiel et al., 2022; Селезнев и др., 2024 и другие]. В последние годы с развитием цифровой сейсморегистрирующей аппаратуры и методов обработки все больше внимания уделяется мониторингу микросейсмических шумов в регионах с проявлениями опасных экзогенных процессов – лавины, горные обвалы, селевые потоки и паводки [van Herwijnen, Schweizer, 2011; Mainsant et al., 2012; Hussain et al., 2019; Le Breton et al., 2021; Лусейкин и др., 2023 и др.].

Селевые потоки, как правило, возникают в бассейнах небольших горных рек во время интенсивного таяния снега или продолжительных ливневых дождей и могут быть крайне разрушительны. При движении селевого потока по руслу вследствие турбулентности потоков и соударений камней и обломков горных пород о стенки и дно русла возникают упругие колебания, которые могут быть зарегистрированы расположенными поблизости сейсмическими станциями. Исследования селевых потоков сейсмическими методами проводятся достаточно давно, в настоящее время в селеопасных районах устанавливаются системы сейсмического мониторинга, позволяющие оценить энергию, длительность, объем селевого потока и другие его параметры [Коваленко и др., 1978; Bessason et al., 2007; Arattano et al., 2016 и другие].

Тункинская долина в Байкальской рифтовой системе также относится к районам с высокой селевой и паводковой опасностью [Perov et al., 2017] – последний катастрофический сел здесь сошел в 2014 г. по реке Кынгара и южным склонам Тункинских гольцов и представлял собой водокаменный поток по руслу реки и несколько грязекаменных потоков [Makarov et al., 2016; Чечельницкий и др., 2018], каждый год во время прохождения обильных дождей здесь также наблюдаются паводки [Makarov et al., 2016]. С целью выявления характеристик микросейсмических шумов во время прохождения селевых потоков и паводков, и выделения возможных критериев их начала в работе проведен анализ записей короткопериодной сейсмической станции Аршан, расположенной на расстоянии 250 м от русла р. Кынгара.

Исследуемый регион

Долина реки Кынгарги расположена в Восточном Саяне в пределах горного хребта Тункинские Гольцы (рис. 1, а). Это ледниково-эрозионные горы с вертикальным расчленением от 600 до 1200 м, формирование которых связано с подъемом плеча Тункинского рифта Байкальской рифтовой системы. Общая длина горной части долины р. Кынгара составляет 7,35 км. Бассейн реки Кынгара имеет два основных рукава, которые берут начало в ледниковых карах на высоте около 2578 м над уровнем моря. В верховьях ее притоков наблюдаются следы ледниковой деятельности. С абсолютной



высоты 1480–1520 м все притоки р. Кынгарга имеют V – образные долины, не имеющие свидетельств ледникового моделирования. Широкая в средней части, за 2 км до выхода с гор на равнинную часть долина реки резко сужается, превращаясь в каньонообразное ущелье, что препятствует свободному выносу твердого материала и приводит к его аккумуляции. Такое строение долины реки при высоких паводках может привести к эффекту кумуляции селевого процесса [Агафонов, 1996]. Установленные закономерности формирования флювиальных процессов и рельефа [Wilford et al., 2004] показывают, что в таких условиях в водосборном бассейне преобладающее развитие будут иметь паводки и водокаменные сели [Kadetova et al., 2016].

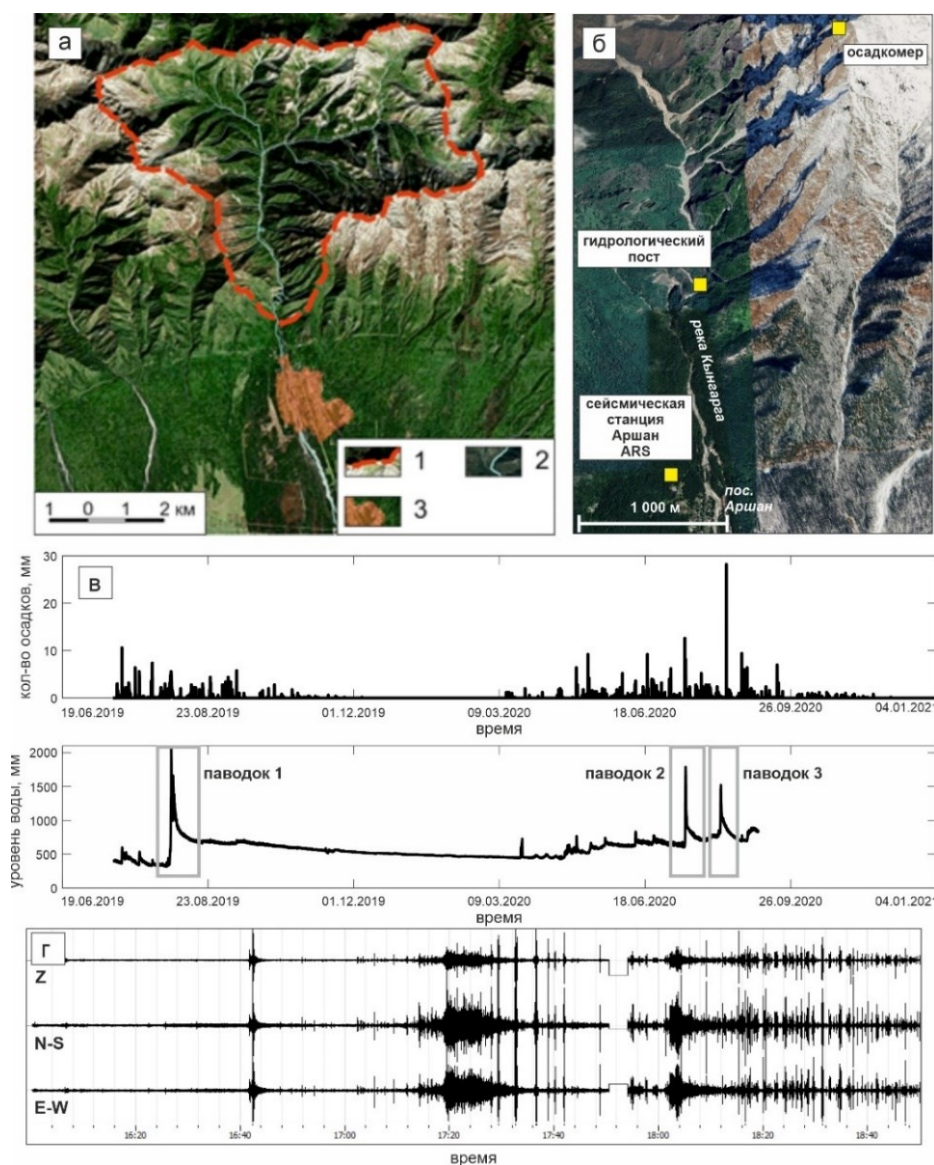


Рис. 1. Положение исследуемого района и схема водосборного бассейна (а) на космическом снимке Google Earth [<https://www.google.ru/intl/ru/earth/>] (1 – граница водосборного бассейна; 2 – водотоки; 3 – территория пос. Аршан); б – положение измерительных приборов; в – графики вариаций количества осадков (вверху) и уровня воды (внизу), серыми прямоугольниками выделены подъемы воды; г – запись селевого потока по р. Кынгарга в 2014 г. на станции ARS (Z – вертикальный канал, N-S, E-W – горизонтальные каналы)

Материалы и методы

В работе использовались данные непрерывной регистрации короткопериодной сейсмической станции «Аршан» (входит в состав региональной сети сейсмостанций



Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», международный код станции ARS, международный код сети – BAGSR), расположенной на окраине поселка Аршан вблизи уступа Тункинских Гольцов на правом берегу р. Кынгарга (рис. 1, б). Расстояние от сейсмопавильона до русла реки составляет 250 м. Установленная на станции аппаратура имеет три короткопериодных сейсмометрических канала повышенной чувствительности N-S, E-W, Z, регистрирующие скорости колебаний (сейсмометры СМ-3). Рабочая полоса частот от 0,5 до 20 Гц. Также в работе использованы данные измерений уровня воды в р. Кынгарге и атмосферных осадков на Пике Любви, проводимых Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН с помощью современных систем мониторинга САМ-ГПР, САМ-ГО (разработаны Институтом мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск) (рис. 1, б). Расстояние от осадкомера на Пике Любви до гидропоста р. Кынгарга – пос. Аршан составляет 1,97 км. Гидрологический пост и метеопост расположены в горной части долины, тогда как сейсмостанция – в равнинной (Тункинская долина), поэтому дожди в долине не приводят к повышению количества осадков в пункте размещения осадкомера и уровня воды на посту, в отличие от дождей в горной области, что необходимо учитывать в дальнейшей работе.

На рис. 1, приведены вариации количества осадков на Пике Любви и уровня воды по данным гидрологического поста на реке Кынгарга за период с июня 2019 г. по январь 2021 г. На графике вариаций уровня воды хорошо видны 3 паводковых события – в июле 2019 г. (паводок 1) и в июле (паводок 2), и в августе (паводок 3) 2020 г. (рис. 1, в). Также отмечаются менее значимые подъемы уровня с конца марта 2020 г.

Нами проводился сравнительный анализ спектральных, спектрально-временных и поляризационных характеристик фонового микросейсмического шума и шума в период сильных паводков – паводки № 1–3 (рис. 1, в), а также записей сейсмических волн, сгенерированных селевыми потоками 2014 г. (рис. 1, г).

Результаты и обсуждение

По результатам спектрального анализа сейсмических шумов, зарегистрированных на станции ARS в зимний период, на всех трех компонентах выделяются четыре основных пика колебаний: широкий пик (№ 1) на низких частотах (0,5–1 Гц), относительно узкий пик (№ 2) с центральной частотой 2 Гц, широкий пик (№ 3) в частотном диапазоне от 4 до 10 Гц и узкий пик (№ 4) с центральной частотой 16 Гц (рис. 2). Низкочастотный пик связан с первичными и вторичными микросейсмами, генерируемыми волнением на озере Байкал (0,4–0,7 Гц и 0,7–1,5 Гц) [Беседина и др., 2024]. Пики № 2–4 в летний период сохраняются, при этом амплитуда пика № 3 значительно увеличивается (примерно в 2,6 раз и выше) и пики № 3 и 4 частично объединяются в один. Второй пик (центральная частота 2 Гц) может быть связан со строением верхней части разреза вблизи сейсмической станции (неоднородность, представляющая собой границу между двумя слоями разной плотности), в то время как третий пик (4–10 Гц) имеет явное сезонное происхождение. Анализ поляризационных диаграмм движения частиц в среде при прохождении сейсмических волн в частотном диапазоне 4–10 Гц (пик № 3) показывает, что движение в горизонтальных плоскостях не имеет единой выраженной ориентации колебаний в летний и в зимний периоды (рис. 2).

По результатам спектрального и поляризационного анализа можно заключить, что спектральный пик на частотах 4–10 Гц представляет собой излучение сейсмических волн в теплый период, генерируемых прохождением водного потока по руслу реки Кынгарга. В зимний период при частичном замерзании реки этот пик становится значительно менее интенсивным. Таким образом, фоновые колебания микросейсмических шумов на станции Аршан в спокойном состоянии представляют собой наложение колебаний низких частот (до 1 Гц), связанных с микросейсмами оз. Байкал, постоянных колебаний с частотами 2 и 16 Гц, поляризованных в направлении восток-запад (пик № 2 с азимутами колебаний $50 \div 170^\circ + \pi$ и пик № 4 с азимутами $80\text{--}130^\circ + \pi$), и колебаний в частотном диапазоне 4–10 Гц, связанных с течением воды по руслу р. Кынгарга.

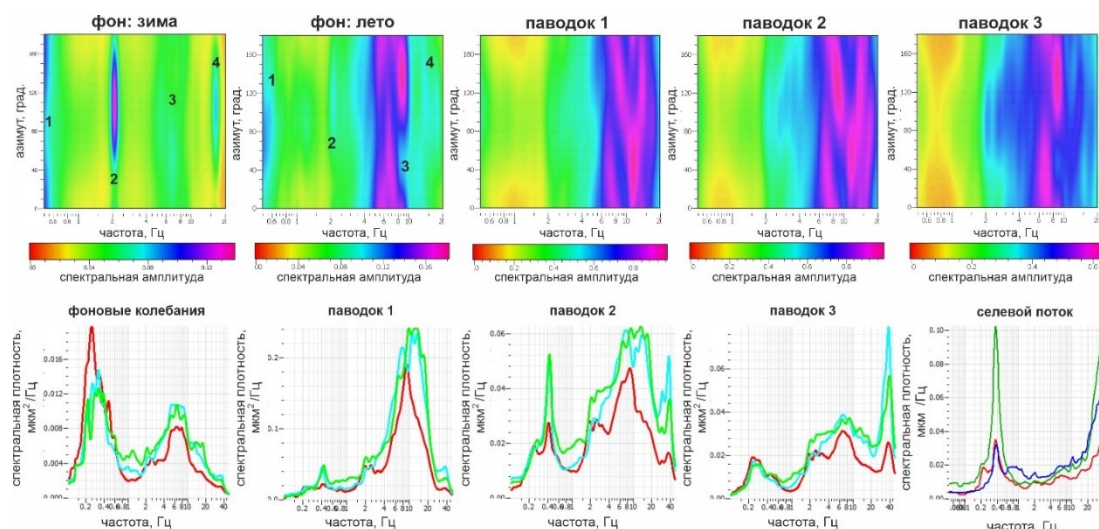


Рис. 2. Поляризационные диаграммы движения частиц в горизонтальной плоскости (вверху) и спектры (внизу), полученные на сейсмической станции Аршан в спокойном состоянии в зимний и летний периоды, при паводках и во время прохождения селевого потока

При прохождении большого объема воды (при паводках) высокочастотная составляющая микросейсмических волн значительно увеличивается (рис. 2). Пик на низких частотах (до 1 Гц) также сохраняется, но его амплитуда, хоть и увеличивается, но становится значительно меньше амплитуды высокочастотного пика (рис. 2). Для разных событий увеличение микросейсмических колебаний относительно фона значительно варьируется: для паводка № 1 максимальные амплитуды больше фона в 25 раз, для паводка № 2 – в 14 раз и для паводка № 3 – в 5 раз. Это связано с количеством водных масс, проходящих по руслу реки в единицу времени. Участок усиления колебаний при прохождении паводка представляет собой широкую полосу от 4 до 20 Гц с максимумом на горизонтальных компонентах. В отличие от фонового, излучения от водного потока, представляющего собой достаточно стабильные колебания в широком частотном диапазоне, при паводках наблюдаются временные вариации как амплитуд излучения, так и его частотного состава. Это связано с нестабильностью водного потока при прохождении паводка, а также включением помех различного происхождения. Максимум излучения для фоновых колебаний находится в области 4–10 Гц, в то время как для излучения в период поднятия воды он сдвигается в область высоких частот – до 20 Гц (рис. 2).

В результате прохождения селевого потока через пос. Аршан в 2014 г. была повреждена линия электропередач, поэтому сейсмическая станция «Аршан» работала с перебоями: с 18 ч 50 мин (27 июня) до 9 ч 45 мин (28 июня) и с 8 ч 47 мин (29 июня) по 7 ч 40 мин (30 июня). Здесь и далее приводится время UTC (местное время – 8 ч). Хотя полностью весь ход селевого потока записать не удалось, на сейсмограммах присутствуют записи сейсмических событий, которые могут быть интерпретированы как начало и окончание движение влекомых наносов (селевых масс) в водокаменном селе, ударов и пр. (рис. 1, г; 3).

На сейсмограммах за 27–29 июня 2014 г. зафиксировано три продолжительных сейсмических события длительностью 8–12 мин (участки I, II III на сейсмограмме, рис. 3), которые могут быть интерпретированы как движение влекомых наносов (каменных и грязекаменных масс) в селевом потоке. Спектр этих событий представлен высокочастотными колебаниями (22–48 Гц), также значительный вклад вносит низкочастотная составляющая – 0,35–0,45 Гц. Такое разделение спектра скоростей колебаний на две составляющие может быть объяснено наложением двух процессов – поток водных масс с образованием турбулентных потоков и удары твердой фракции селевого потока о дно и стенки русла. Поляризационный анализ сейсмических записей во время селевого потока показал преобладание северо-восточной или север-северо-



восточной ориентации колебаний при слабой выраженности колебаний в вертикальной плоскости (рис. 3). Это свидетельствует о том, что зарегистрированные сейсмические волны являются поверхностными волнами (преимущественно, это волны Лява, и, в меньшей степени, волны Рэлея и поверхностные волны типа рэлеевских). Так как в волнах Лява движение частиц перпендикулярно направлению распространения волны, то можно заключить, что источник возбуждения упругих колебаний находился на востоке – северо-востоке от сейсмической станции Аршан. Это направление соответствует пространственному положению изучаемых селевых потоков.

Интересно, что за приблизительно за 40 мин до прохождения селевых масс по руслу р. Кынгарга в пределах пос. Аршан на сейсмограмме наблюдается резкое импульсное увеличение амплитуды колебаний (рис. 3, фаза 1), за которым следует общее увеличение амплитуд сейсмического шума, сопровождающееся выраженной поляризацией колебаний в север-северо-восточном направлении (рис. 3, фаза 2). Фазу 1 логично связать с разрушением естественной плотины в русле реки, перекрывавшую накопленные селевые массы, вследствие размыва при выпадении большого количества атмосферных осадков, фазу 2 – с движением селевых масс в верховьях реки.

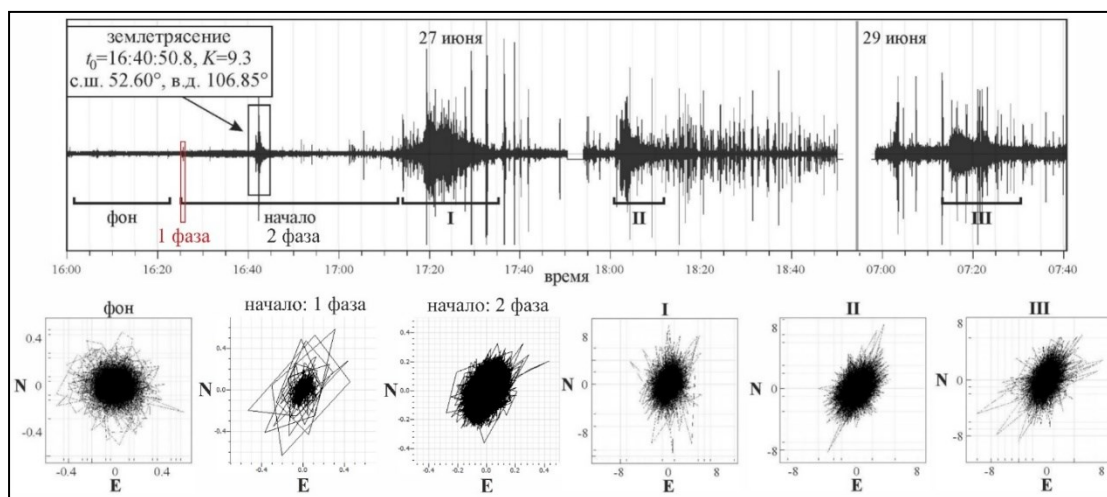


Рис. 3. Фрагменты сейсмограмм 27 и 29 июня 2014 г. Скобками показаны участки фоновых колебаний, начала селевой активности и записи движения селевых масс (I, II и III). Для отдельных участков внизу показаны диаграммы поляризации колебаний в горизонтальной плоскости. Прямоугольником выделено региональное землетрясение в районе Южного Байкала

Генерация сейсмических волн водным потоком происходит вследствие турбулентности, возникающей при течении потока по дну и вдоль бортов реки, а также при встрече потока с препятствиями (в случае русла реки Кынгарга – это валуны и крупные камни). В зимний период, когда р. Кынгарга покрыта толстым слоем льда, движение водных масс по руслу проходит в спокойном режиме с постоянной скоростью с минимальным образованием турбулентных потоков, и, соответственно, в спектре сейсмических волн исчезает пик в области высоких частот (рис. 2). В теплый период увеличивается уровень воды в русле за счет таяния снегов и выпадения атмосферных осадков, скорость течения увеличивается и возникают турбулентные волны, которые генерируют в спектре микросейсмических шумов усиление сейсмических волн в частотном диапазоне до 10 Гц (рис. 2). При прохождении больших объемов воды (паводки) также увеличивается скорость потока и количество встречаемых потоком препятствий, что приводит к усилению турбулентности, вследствие чего происходит изменение амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний, выражающееся в появлении высокоамплитудного пика в области частот от 4 до 20 Гц (рис. 2). При прохождении селевых потоков на сейсмограммах наблюдается разделение спектра сейсмических колебаний на две составляющие, связанные с двумя процессами –



поток водных масс с образованием турбулентных потоков и удары твердой фракции селевого потока о дно и стенки русла (рис. 3).

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено следующее.

1. Микросейсмические колебания, зарегистрированные на станции Аршан, не стабильны во времени и имеют значительные вариации, связанные с сезоном. В теплые периоды при таянии ледового покрова и увеличении уровня воды в реке Кынгарга наблюдается усиление сейсмических колебаний в области частот от 4 до 10 Гц.

2. Выпадение обильных жидких атмосферных осадков и следующий за ним значительный подъем воды в реке Кынгарга приводят к изменению амплитудно-частотного состава микросейсмических шумов – усилению колебаний в частотном диапазоне от 4 до 20 Гц с максимумом излучения в области частот 6–10 Гц. Для разных событий это увеличение значительно варьируется и зависит от количества водных масс, проходящих по руслу реки в единицу времени.

3. Изменение амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний в летний период относительно зимнего, а также во время паводков относительно меженных уровней происходит в результате увеличения турбулентности потока при возрастании скорости течения, расходов воды и наносов.

4. Диаграммы движения частиц в среде в спокойном состоянии и при паводках не показывают какой-либо доминирующей ориентации колебаний, что связано с протяженностью источника колебаний, представляющего собой все русло реки.

5. При прохождении селевого потока на сейсмограммах наблюдается разделение спектра сейсмических колебаний на две составляющие, связанные с двумя процессами – поток водных масс с образованием турбулентных потоков и удары твердой фракции селевого потока о дно и стенки русла.

6. Диаграммы движения частиц в среде при прохождении селевого потока показывают резкую смену направления колебаний с доминирующей ориентацией, указывающей направление на источник возмущений.

7. Начало разрушения естественной плотины и движения селевых масс фиксируется на сейсмической записи за достаточно большой промежуток времени до прохода селевого потока через пункт регистрации, в нашем случае этот промежуток составил порядка 40 мин.

На основе полученных результатов нами предлагается система мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока. Система состоит из комплекса оборудования, позволяющего контролировать условия формирования селевого потока, уровень и концентрацию твердой составляющей в водном/селевом потоке, осуществлять передачу данных на вычислительную станцию и при достижении критических значений (фиксирующих формирование селевого потока) подавать сигналы предупреждения об угрозе схода селевого потока.

В комплекс системы должно входить следующее оборудование:

- метеостанция для измерения и контроля климатических селеформирующих условий (температура, осадки, влажность);
- сейсмические станции для определения начала повышения уровня воды и движения селевых масс;
- фотоловушки/видеокамеры для визуального контроля водного/селевого потока и русла селеопасной реки;
- уровнемер для контроля уровня водного/селевого потока;
- телеметрическая станция для сбора и передачи данных на вычислительную станцию;
- вычислительная станция для анализа контрольных параметров селеформирующих условий, характеристике водного/селевого потока и подачи сигнала о формировании селевого потока на систему оповещения;
- система оповещения для сигнализации органов местного самоуправления, органов ГО и ЧС, а так же населения о селевой угрозе.



Принципиальная схема размещения элементов системы предупреждения представлена на рис. 4.

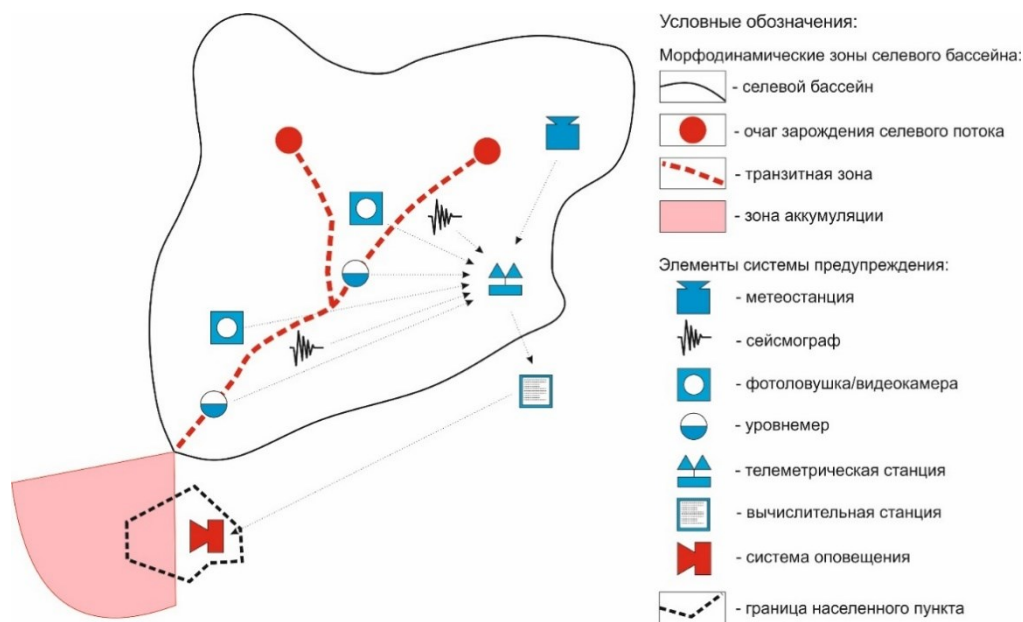


Рис. 4. Принципиальная схема размещения элементов системы предупреждения о селевой опасности

Техническая сущность системы предупреждения заключается в следующем: при отсутствии переменных локальных источников возбуждения сейсмических колебаний состав и уровень микросейсмического шума остаются постоянными, а поляризация колебаний в микросейсмической волне вследствие сложения сейсмических колебаний разной природы и пришедших из разных азимутов на сейсмическую станцию не имеет четко выраженной ориентации. При движении селевого потока по руслу из-за турбулентности потоков и соударений в горных породах возникают упругие колебания, которые регистрируются сейсмическими станциями и вызывают увеличение уровня и спектрального состава и поляризации микросейсмического шума.

По результатам анализа инструментально регистрируемых сейсмических параметров и последующей обработки полученных данных, в качестве прогнозного параметра выбраны вариации поляризации и изменение спектрального состава микросейсмических колебаний, являющиеся следствием возникновения упругих колебаний при прохождении селевого потока. Использование данного прогнозного параметра в значительной степени повышает достоверность определения приближения селевого потока, т.к. микросейсмические колебания регистрируются в каждой точке Земли и отражают текущее состояние геофизической системы и его изменения.

Следует отметить, что оборудование системы предупреждения не имеет прямого (механического) контакта с селевым потоком, это позволяет системе сохранять работоспособность при прохождении селевого потока.

Благодарности и финансирование

Исследование выполнено с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (уникальная научная установка «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира»).

В работе использовался программный комплекс Geopsy, разработанный в ходе реализации общеевропейского проекта SESAME, направленного на разработку критериев, методов и инструментов анализа микросейсмических колебаний разной природы [Wathelet et al., 2020].



Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Список литературы

- Агафонов Б.П. Кумулятивные сели в Прибайкалье // Геоморфология. – 1996. – № 2. – С. 27–36.
- Беседина А.Н., Тубанов Ц.А., Предин П.А., Санжиева Д.П., Иванченко Г.Н. Особенности микросейсм озера Байкал по данным сети сейсмических станций // Физика Земли. – 2024. – № 3. – С. 30–50.
- Коваленко П.И., Красюков В.А., Новиков М.Я., Степанов Б.С. Результаты испытаний сейсмической системы оповещения о селевой опасности // Селевые потоки: сб. 3. – М.: Гидрометеиздат, 1978. – С. 92–96.
- Чечельницкий В.В., Макаров С.А., Добрынина А.А. Прохождение катастрофического водокаменного селя на реке Кынгарга (Республика Бурятия) 27–29 июня 2014 г. по сейсмическим данным // Доклады Академии наук. 2018. – Т. 481. – № 6. С. 675–679.
- Ярошевич М.И., Ингель Л.Х., Лысенко Д.А. Сейсмические проявления атмосферных процессов // Научное обозрение. Технические науки. 2016. – № 5. – С. 103–115.
- Arattano M., Coviello V., Abancó C., Hürlimann M., McArdell B.W. Methods of data processing for debris flow seismic warning // International Journal of Erosion Control Engineering. – 2016. – Vol. 9, No. 3. – P. 114–121.
- Bessason B., Eiríksson G., Thórarinnsson O., Thórarinnsson A., Einarsson S. Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods // Journal of Glaciology. – 2007. – Vol. 53, No. 182. – P. 461–472.
- Burjánek J., Gassner-Stamm G., Poggi V., Moore J.R., Fäh D. Ambient vibration analysis of an unstable mountain slope // Geophysical Journal International. – 2010. – Vol. 180, No. 2. – P. 820–828.
- Chmiel M., Godano M., Piantini M., Brigode P., Gimbert F., Bakker M., Courboux F., Ampuero J.-P., Rivet D., Sladen A., Ambrois D., Chapuis M. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2022. – Vol. 22. – P. 1541–1558.
- Del Gaudio V., Wasowski J., Hu W. Ambient noise and ERT data provide insights into the structure of co-seismic rock avalanche deposits in Sichuan (China) // Bull Eng Geol Environ. – 2021. – Vol. 80. – P. 7153–7170.
- Dietze M., Hoffmann T., Bell R., Schrott L., Hovius N. A seismic approach to flood detection and characterization in upland catchments // Geophysical Research Letters. – 2022. – Vol. 49. – e2022GL100170.
- Guillemot A., van Herwijnen A., Larose E., Mayer S., Baillet L. Effect of snowfall on changes in relative seismic velocity measured by ambient noise correlation // The Cryosphere. – 2021. – Vol. 15. – P. 5805–5817.
- Hussain Y., Martinez-Carvajal H., Condori C., Uagoda R., Cárdenas-Soto M., Cavalcante A.L.B., Cunha L.S. da, Martino S. Ambient Seismic Noise: a continuous source for the dynamic monitoring of landslides // Terræ Didactica. – 2019. – Vol. 15, No. 1–5. – e01001.
- Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Kozyreva E.A., Tie Y., Ni H. Debris flow event of 2014 and its impact on the accumulation of the solid fraction in the Kyngarga river channel, Tunka valley, South-western Cisbaikalia, Russia // Geodynamics & Tectonophysics. – 2016. Vol. 7, No. 2. – P. 329–335. – DOI: 10.5800/GT-2016-7-2-0210.
- Le Breton M., Bontemps N., Guillemot A., Baillet L., Larose E. Landslide monitoring using seismic ambient noise correlation: challenges and applications // Earth-Science Reviews. – 2021. – Vol. 216. – P. 103518.
- Mainsant G., Larose E., Brönnimann C., Jongmans D., Michoud C., Jaboyedoff M. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction // J. Geophys. Res. – 2021. – Vol. 117. – F01030.
- Makarov S., Cherkashina A., Atutova Zh., Bardash A., Voropai N., Kichigina N., Mutin B., Osipova O., Ukhova N. Debris Flows of the Tunkinsky Goltzy Mountains (Tunkinsky District, Republic of Buryatia in Eastern Siberia) // International Journal of Geohazards and Environment. – 2016. – Vol. 2, No. 3. – P. 166–179.



- Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events // *Natural Hazards*. – 2017. – Vol. 88. – P. 199–235.
- van Herwijnen A., Schweizer J. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor // *Cold Regions Science and Technology*. – 2011. – Vol. 69, No. 2–3. – P. 165–176.
- Wathelet M., Chatelain J.-L., Cornou C., Di Giulio G., Guillier B., Ohrnberger M., Savvaidis A. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing // *Seismological Research Letters*. – 2020. – Vol. 91, No. 3. – P. 1878–1889.
- Wilford D.J., Sakals M.E., Innes J.L., Sidle R.C., Bergerud W.A. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics // *Landslides*. – 2004. – Vol. 1, No. 1. – P. 61–66.