

УДК 550.348+551.435.16

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ СЕЛЯ НА р. КЫНГАРГА (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

Добрынина А.А.^{1,2}, Чечельницкий В.В.³, Макаров С.А.⁴

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

² Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

³ Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, *chchel@crust.irk.ru*

⁴ Институт географии им В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, *makarov@irigs.irk.ru*

Введение

Река Кынгарга берет начало на южных склонах хр. Тункинские Гольцы (Восточный Саян) на высоте 2260 м и впадает в р. Тунка. Согласно карте селевой опасности России [7], район Восточного Саяна, где был сформирован разрушительный селевой поток 2014 г., относится к областям с высокой селевой активностью. Селевые потоки на р. Кынгарга формировались неоднократно – за последнее столетие они проходили в 1897, 1903, 1912, 1952, 1962, 1971 годах. В ночь с 27 на 28 июня 2014 г. в районе пос. Аршан Тункинского района Республики Бурятия в результате интенсивных ливневых осадков сформировались селевые потоки двух типов: 1) катастрофический водокаменный сель по р. Кынгарга; 2) грязекаменные потоки по долинам, берущим начало в карах южного склона хребта Тункинские Гольцы (рис. 1) [2, 6]. Гидрологический пост на р. Кынгарга был закрыт в 1987 г., поэтому при прохождении водокаменного селя в 2014 г. инструментальные наблюдения не проводились. Единственной достоверной фиксацией движения влекомых наносов могла быть только сейсмическая запись.

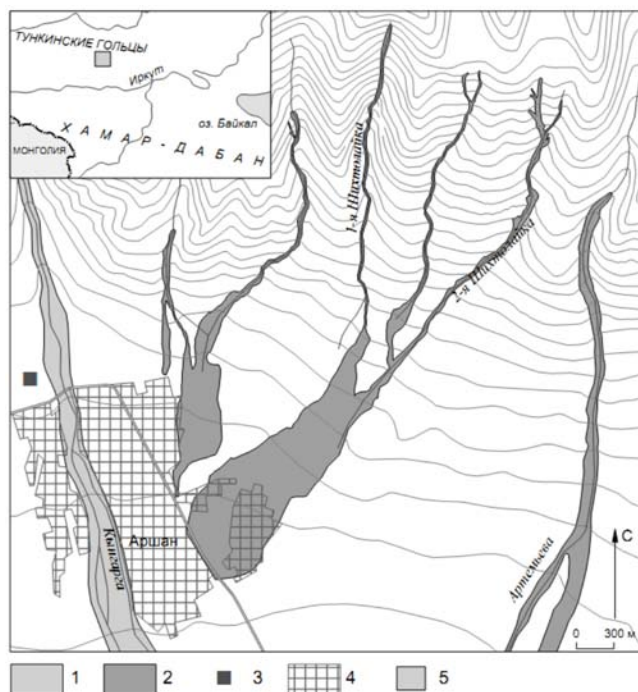


Рис. 1. Схема формирования селей в окрестностях пос. Аршан. Зоны прохождения селей: 1 – водокаменного, 2 – грязекаменного; 3 – сейсмическая станция «Аршан»; 4 – границы поселения Аршан; 5 – район исследований (на врезке).

и далее приводится время UTC (местное время минус 8 часов). Хотя полностью весь ход селевого потока записать не удалось, на сейсмограммах присутствуют записи сейсмических событий, которые могут быть интерпретированы как начало и окончание движения влекомых наносов (селевых масс) в водокаменном селе, ударов и пр.

Нами анализировались данные непрерывной сейсмической регистрации за период 26 июня – 29 июля 2014 года, полученные на сейсмической станции «Аршан» (входит в состав сети сейсмостанций Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», международный код станции ARS, международный код сети – BAGSR), расположенной на окраине поселка Аршан ближе к Тункинским Гольцам на правом берегу р. Кынгарга (рис. 1). Наименьшее расстояние от сейсмопавильона до русла реки составляет 250 м. Установленная на станции аппаратура имеет три короткопериодных сейсмометрических канала повышенной чувствительности, регистрирующие скорости смещения почвы (сейсмометры СМ-3).

В результате прохождения селевого потока была повреждена линия электропередач, поэтому сейсмическая станция «Аршан» работала с перебоями: с 18 часов 50 минут (27 июня) до 09 часов 45 минут (28 июня) и с 08 часов 47 минут (29 июня) по 07 часов 40 минут (30 июня). Здесь

Были исследованы как фоновые (микросейсмические) колебания, так и записи отдельных селевых событий. Чтобы установить нормальный режим фоновых колебаний на станции «Аршан», дополнительно были проанализированы микросейсмические записи за предыдущие годы (2004 – 2014 гг.). Для того чтобы избежать влияния сезонных условий (промерзание грунтов в зимний период), анализировались записи летнего периода (июнь – июль). Согласно полученным данным, микросейсмические колебания в спокойной обстановке представлены, в основном, цугами низкочастотных сейсмических волн (пики наблюдаются на частотах 0.25, 2.00 и 6.00 Гц). Поляризационный анализ не показывает какого-либо доминирующего направления колебаний. На записи 27 июня 2014 г. до 16 часов 25 минут микросейсмический фон также оставался спокойным (рис. 2). С указанного времени наблюдается общее увеличение амплитуды микросейсмических колебаний. На фоне этих изменений в 16:41:36.7 зарегистрированы сейсмические волны от слабого землетрясения в районе Южного Байкала (энергетический класс $K_p = 9.3$, расстояние до станции «Аршан» 310 км, по данным БФ ФИЦ ЕГС РАН [3]). По причине его удаленности и малой энергии оно никак не связано с последующими событиями. После землетрясения на фоне микросейсмических колебаний отмечается несколько отдельных импульсных событий, со временем их количество и амплитуда возрастают, поляризационный анализ показывает преобладание северо-восточного направления колебаний в горизонтальной плоскости. В 17 часов 18 минут зарегистрировано начало движения влекомых наносов по дну реки Кынгарга (см. участок I на рис. 2). Сейсмограмма имеет форму вытянутой капли, максимум достигается за 37 секунд, потом идет постепенное понижение амплитуды сигнала (рис. 3). На фоне записи наблюдаются отдельные импульсные события высокой амплитуды. Спектрально-поляризационный анализ показывает преобладание в спектре сигнала высоких частот 24 – 44 Гц (рис. 3) и выраженную северо-восточную ориентацию колебаний, вертикальная компонента колебаний выражена очень слабо (см. рис. 2). После интегрирования на сейсмограмме (записи смещений) преобладают низкочастотные колебания (0.3 – 0.5 Гц). Общая длина события до снижения уровня фона до уровня начала селевой активности оценивается в 12 минут 10 секунд.

Второе движение селевых масс по дну реки зарегистрировано в 18 часов 02 минуты (см. участок II на рис. 2), по длительности (~8 минут) и амплитуде оно слабее первого. В спектре скоростей колебаний также преобладают высокочастотные колебания (21–45 Гц, максимум на 32–40 Гц), а низкочастотная составляющая (0.35–0.40 Гц) выражена более слабо (см. рис. 3). Сейсмограмма начинается с резкого увеличения фона, через 1 минуту 10 секунд амплитуда увеличивается и ее максимум сохраняется в течение 50 секунд, потом начинается постепенное снижение уровня (см. рис. 3). Поляризация колебаний в горизонтальной плоскости с север–северо-восточной ориентацией, слабо выражена вертикальная компонента колебаний (см. рис. 1). На хвосте записи наблюдается несколько импульсных событий. После этого уровень микросейсмических колебаний остается повышенным, колебания поляризованы в северо-восточном направлении. На общем фоне регистрируются многочисленные импульсные события разной длительности (см. рис. 2), что свидетельствует о безостановочном (с чередованием ускорений и замедлений) движении влекомых наносов.

28 июня регистрация сейсмических событий началась с 09 часов 45 минут. Общий уровень фона в несколько раз выше, чем 27 июня. В спектре скоростей колебаний преобладают средние и высокие частоты (общий пик от 2 до 20 Гц), слабый пик отмечается в диапазоне 0.15 – 0.60 Гц. Поляризационный анализ не показывает преобладающего направления колебаний. На этом фоне с 10 часов 25 минут до 13 часов 50 минут наблюдается серия из нескольких десятков отдельных импульсных событий со смешанной ориентацией движения частиц – от северо-западной до северо-восточной. По характеру сейсмограммы эту запись можно отнести к активности при окончании движения влекомых наносов: такие же серии импульсных событий наблюдались после селевых потоков 27 июня (см. участки записи после отрезков I и II на рис. 2).

После окончания серии импульсных событий микросейсмический фон остается спокойным, нет выраженной поляризации колебаний. 29 июня в 01 час начинается череда изменений спектрально-поляризационных характеристик фоновых колебаний: доля высокочастотной составляющей в спектре скоростей колебаний то усиливается, то ослабевает, поляризация колебаний меняется от северо-восточной до северо-западной, временами возвращаясь в нормальное состояние. Последнее движение влекомых наносов начинается в 07 часов 15 минут (см. участок III на рис. 2). Запись имеет форму узкой вытянутой капли, длительность ~12 минут (рис. 3). На фоне селевой активности зарегистрировано несколько импульсных и продолжительных событий. После интегрирования в записи смещений появляются низкочастотные колебания – в середине и в конце движения влекомых

наносов. В отличие от обоих предыдущих событий в спектре последнего движения выражены умеренные частоты – от 2 до 7 Гц, низкочастотная составляющая выражена слабо (рис. 3). Максимум излучения наблюдается в диапазоне 24 – 44 Гц, пик – на 38 – 40 Гц. Для событий на фоне селя преобладают высокие частоты (25 – 40 Гц). Поляризационный анализ показывает стабильную северо-восточную ориентацию колебаний в горизонтальной плоскости как для самого движения влекомых наносов, так и для импульсных событий на его фоне. На стадии завершения движения селевых масс уровень фона сохранялся постоянным, также наблюдалась серия отдельных импульсных событий. Поляризация колебаний меняется от меридиональной до северо-восточной. Уровень микросейсмических колебаний на конец регистрации 29 июня (08 часов 47 минут) так и не вернулся к первоначальному значению, зарегистрированному 26 июня (до начала селевой активности).

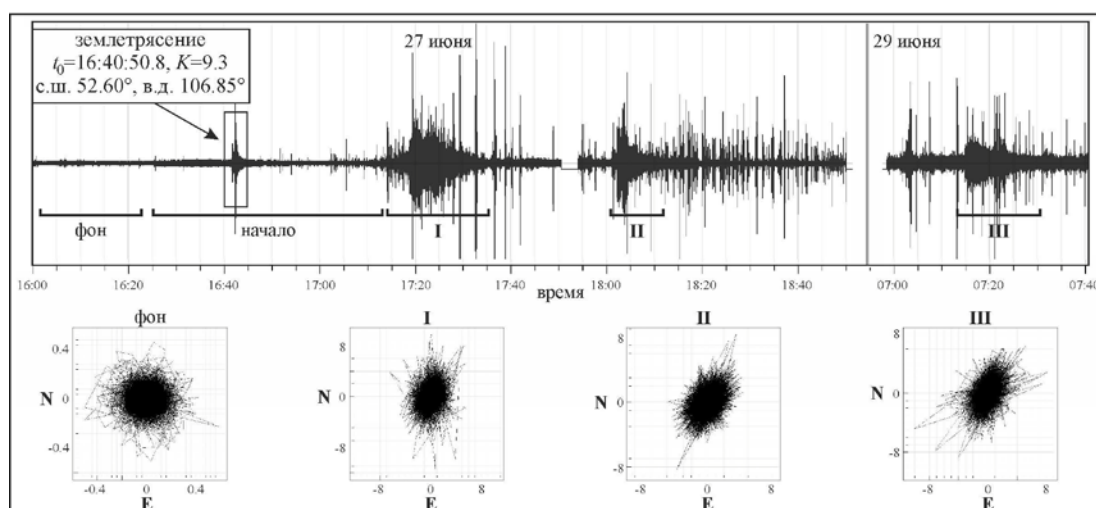


Рис. 2. Фрагменты сейсмограмм 27 и 29 июня 2014 г. Скобками показаны участки фоновых колебаний, начала селевой активности и записи движения влекомых наносов (I, II и III). Для отдельных участков внизу показаны диаграммы поляризации колебаний в горизонтальной плоскости. Прямоугольником выделено региональное землетрясение в районе Южного Байкала.

Исходя из анализа сейсмических записей, можно заключить, что движение селевых масс, представленных валунно-галечниковыми отложениями, началось 27 июня в 17 часов 19 минут и продолжалось, то ослабевая, то усиливаясь, в течение почти трех суток. На сейсмограммах зафиксировано три продолжительных сейсмических события длительностью 8 – 12 минут, которые могут быть интерпретированы как движение влекомых наносов в селевом потоке. Спектр этих событий представлен высокочастотными колебаниями (22 – 48 Гц), также значительный вклад вносит низкочастотная составляющая – 0.35 – 0.45 Гц. Те же низкочастотные колебания наблюдаются и для фона за весь период селевой активности. 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. В процессе движения влекомых наносов, а также до их начала и в конце отмечаются разнородные высокочастотные импульсные и достаточно продолжительные события (их длительность может варьироваться от 2 до 30 секунд), которые также представляют собой соударения и волочение камней и обломков горных пород в русле потока.

Поляризационный анализ сейсмических записей во время селевого потока (перемещение селевых масс, отдельные импульсные события и микросейсмический фон) показал преобладание северо-восточной или север-северо-восточной ориентации колебаний при слабой выраженности колебаний в вертикальной плоскости. 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 – юго-востоке от сейсмической станции «Аршан». Это направление соответствует пространственному положению изучаемых селевых потоков (см. рис. 1).

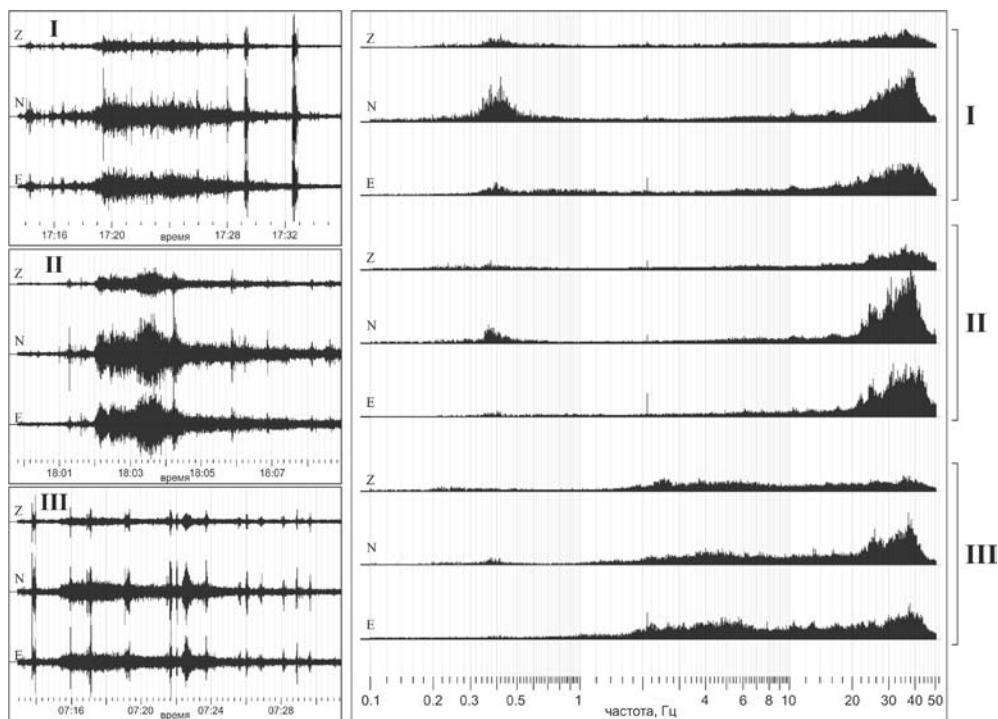


Рис. 3. Сейсмограммы (слева) и частотный состав (справа) селевых событий 27 и 29 июня 2014 года. Для удобства сопоставления амплитуда колебаний по отдельным компонентам нормирована на общий максимум.

Анализ прохождения селевого потока 27 – 29 июня 2014 г. на основе сейсмических записей стал возможным благодаря положению сейсмической станции непосредственно в районе прохождения селя. Однако, еще в 1973 году, И.Е. Гольпериным была высказана мысль о возможности создания региональной сети оповещения о селевой опасности, основанной на регистрации сейсмических колебаний [1]. Подобные мониторинговые сети в настоящее время действуют на территории многих селеопасных районов мира [4, 5 и другие]. Установка локальных сетей сейсмических станций в селеопасных зонах на территории РФ в будущем даст возможность проводить детальные исследования процессов и характеристик селевых потоков, изучать соотношения между свойствами самих потоков и параметрами возбуждаемых ими сейсмических волн, а также позволит организовать систему раннего предупреждения о приближении селя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 17-45-388088. Работа Добрыниной А.А. выполнена в рамках темы НИР ПФНИ ГАН IX.136.1.2. Исследование факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность Прибайкалья (Гос номер АААА-А16-116121550016-3).

Список литературы

1. Красюков В.А. Основные конструктивно-функциональные особенности датчиков систем оповещения о селевой опасности // Селевые потоки. Сб. 2. М.: Гидрометеоздат, 1977. С. 64–66.
2. Макаров С.А., Черкашина А.А., Атутова Ж.В., Бардаш А.В., Воронай Н.Н., Кичигина Н.В., Мутин Б.Ф., Осипова О.П., Ухова Н.Н. Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2014. 111 с.
3. Масальский О.К., Гилёва Н.А., Хайдунова Е.В., Тубанов Ц.А. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения России в 2014 г. Обнинск: ГС РАН, 2016. С.37–42.
4. 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. V. 9(3). P. 114–121.
5. Bessason B., Eiriksson G., Thórarinnsson O., Thórarinnsson S. Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods // Journal of Glaciology. 2007. V. 53(182). P. 461–472.
6. Makarov S., Cherkashina A., Atutova Zh., Bardash A., Voropai N., Kichigina N., Mutin B., Osipova O., Ukhova N. Debris Flows of the Tunkinsky Goltsy Mountains (Tunkinsky District, Republic of Buryatia in Eastern Siberia) // International Journal of Geohazards and Environment. 2016. V. 2(3). P. 166–179.
7. 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. P. 1–37.