Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.834.8

DOI: 10.19110/geov.2020.1.4

ПАССИВНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОПОЛЗНЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ Г. ВОРКУТЫ

В. А. Лютоев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; lutoev@geo.komisc.ru

Статья посвящена определению механизмов развития оползней на береговом склоне р. Воркуты. Изучаемая территория протяженностью 400 метров вплотную примыкает к проезжей части ул. Шахтерская Набережная г. Воркуты. Инженерно-геологический разрез склона представлен рыхлыми, полускальными и скальными грунтами, поэтому здесь возможны простые и сложные виды оползней. Нами использовался трехосный акселерометр, который позволяет регистрировать акселерограмму с возможностью дальнейшего пересчета в велосигramму и сейсмограмму микросейсмического события. В зимнее время замерзающая вода, находящаяся в трещинах скальных пород, расширяется, в результате чего появляются сколы и микротрещины, ускоряется процесс циклического выветривания. В рыхлых породах наблюдается неоднозначная последовательность: при замерзании воды в песках происходит их упрочнение, а в суглинках, глинах и в тонких песках в силу свойств высокой пучинистости одновременно с упрочнением происходит выдавливание окружающего грунта. В слоистом разрезе склона происходит постепенное перераспределение сил напряжения, где суммарное воздействие также способствует снижению первоначальной устойчивости грунтов из-за проявления ползучести глин после их оттаивания. Эти непрерывные изменения хорошо фиксируются на акселерограммах сейсмических записей, отображающих упругие (нет переноса вещества) и неупругие (осуществляется перенос вещества) процессы. Всего на склоне было выявлено четыре вида явлений: блоковые, сдвига-скольжения, разжижения-течения и развития микротрещин в скальном грунте. Кроме того, нами были смоделированы экспериментальные акселерограммы и спектрограммы, которые по своим формам идентичны акселерограммам и спектрограммам, зарегистрированным на реальном участке движения оползней.

Ключевые слова: склон, оползни, грунты рыхлые и скальные, мерзлые грунты, фазовый переход, талые грунты, циклический процесс, акселерограммы и спектрограммы, моделирование, сравнение.

PASSIVE SEISMIC CONTROL OF LANDSLIDES DISLOCATIONS OF VORKUTA CITY

V. A. Lutoev

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

This article is devoted to determining the mechanisms of development of landslides on the coastal slope of the Vorkuta river. The studied territory with a length of 400 meters is adjacent to the roadway of Shakhterskaya St. embankment in Vorkuta. The engineering-geological section of the slope is represented by loose, semi-rocky and rocky soils, therefore, simple and complex types of landslides are possible here. We used a three-axis accelerometer, which allowed registering an accelerogram with the possibility of further conversion into a cycle diagram and a seismogram of a microseismic event. In winter, freezing water, located in rock cracks, expands, as a result of which chips and microcracks appear, and the cyclic weathering process is accelerated. In loose rocks, an ambiguous sequence is observed: when water freezes in the sands, they are hardened, and in loams, clays and thin sands, due to the properties of high heaving, extrusion of the surrounding soil occurs simultaneously with hardening. In the layered section of the slope, a gradual redistribution of the stress forces occurs, where the total impact also helps to reduce the initial stability of the soil caused by the creep of clays after thawing. These continuous changes are well recorded on accelerograms of seismic records displaying elastic (no transfer of matter) and inelastic processes (transfer of matter is carried out). In total, four types of phenomena were revealed on the slope: block, shear-slip, liquefaction-current, and the development of microcracks in rocky soil. In addition, we simulated experimental accelerograms and spectrograms, which are identical in shape to the accelerograms and spectrograms recorded on the real site of landslide movement.

Keywords: slope, landslides, loose and rocky soils, frozen soils, phase transition, melt soils, cyclic process, accelerograms and spectrograms, modeling.

Для цитирования: Лютоев В. А. Пассивный сейсмический контроль оползневых смещений г. Воркуты // Вестник геонаук. 2020. 1(301). С. 24—30. DOI: 10.19110/geov.2020.1.4.

For citation: Lutoev V. A. Passive seismic control of landscape displacements of Vorkuta city. Vestnik of Geosciences. 2020. 1(301). Pp. 24—30. DOI: 10.19110/geov.2020.1.4.

Для определения первичного потенциала оползневой опасности на исследуемом участке предварительно были выяснены местные инженерно-геологические условия [7]: крутизна склона, наклон геологических слоев в сторону базиса, состав и инженерно-геологические свойства слагающих грунтов. Далее были учтены гидро-геологические условия: наличие водоносных горизонтов, роль эрозионной деятельности реки, колебание базиса эрозии, размыв берега, подрезка склона, интенсивность выветривания как рыхлых, так и скальных грунтов, степень увлажнения грунта, объем выноса частиц грунта суффозией. Непоследнюю роль в процессе выветривания играет и местное природно-техногенное влияние на массив склона: вибродинамические нагрузки, аварийные ситуации в тепловых сетях при жилищно-коммунальном хозяйстве, утечки горячей воды в окружающее пространство, местные землетрясения [4], горные удары в шахтах угледобычи.

Для прогнозной оценки нынешнего состояния берегового склона Шахтерской Набережной был применен пассивный сейсмический метод [6], фиксирующий микросейсмы природного и природно-техногенного характера в скальных и в рыхлых отложениях. В результате нами относительно быстро были зарегистрированы различные микротектонические процессы, происходящие внутри грунтовых масс, в виде излучения упругих и неупругих микросейсмических колебаний в пунктах наблюдений. В дальнейшем выявленные очаги могут сыграть преобладающую роль в инициации оползней. Измерения показали, что цуги волн акселерограмм излучались из различных слоев разреза. В скальных грунтах они высокочастотные, в полускальных — промежуточные, в рыхлых — низкочастотные, в текучих — поляризованные. Таким образом, на основе волновой картины по акселерограммам можно оперативно определить максимальную амплитуду ускорения смещения

почвы, которой соответствует максимум энергетического спектра колебаний и, следовательно, вектор направления движения грунта, который в дальнейшем может стать первоисточником энергетического выброса энергии в виде оползня.

Для того, чтобы решить практическую задачу в данном круге проблем, необходимо предварительно подобрать физические модели, которые в первом приближении будут отвечать исследуемым микросейсмическим процессам. Нами в лабораторных условиях были подобраны несколько моделей, копирующих микротектонические процессы.

Прилегающая к склону территория застроена пяти- и девятиэтажными зданиями. Эффективный угол падения склона составляет около 10° , склон завершается крутым береговым откосом $35\text{--}40^\circ$ при высоте от уреза водной поверхности реки до гребня в среднем 40 м. Наиболее активные области скольжения грунтовых масс отмечаются в центральной зоне протяженностью полторы сотни метров между пикетами pk-1 — pk-4. На данном интервале, где ранее уже были выполнены геодезические работы, на четырех пунктах наблюдений нами были установлены сейсмические датчики (рис. 1).

Центральная оползневая зона вплотную примыкает к проезжей части улицы Шахтерская Набережная. Ранее геодезистами было установлено, что здесь в 2006—2007 гг. на отдельных участках произошло перемещение реперов в горизонтальном направлении на расстояние от 0.02 до 0.2 м, а в зоне основного обрушения — на участке шириной около 25 м — более чем на 1.5 м. В связи с этими событиями было проведено укрепление откоса на обрушившемся участке обсыпкой крупнообломочного скального грунта в основании склона. Однако эти мероприятия не принесли значимых результатов.

Причинами обрушения склонов являются прежде всего следующие факторы: наличие наклона рельефа в

Рис. 1. Пункты наблюдений с/с ZetLab для выявления микротектонических процессов вдоль улицы Шахтерская Набережная г. Воркуты (pk — пикеты наблюдений, pr — профиль склона)

Fig. 1. Observation points from the ZetLab s/s to detect microtectonic processes along the Shakhterskaya embankment street of Vorkuta (pk — observation points, pr — slope profile)

сторону реки, переувлажнение грунта, снеготаяние, дождевые осадки, таяние мерзлых пород при контакте с горячей водой, протечка подземных коммуникаций с последующим промерзанием и расширением объема замерзшей воды в зимнее время в выветрелых слоях полускальных грунтов [3]. Менее заметны процессы разрушения в скальных породах. В теплый период времени внутри пограничной зоны между скальными и полускальными породами образуется мелкодисперсная жижа, которая снижает сцепление горных пород на границе их соприкосновения.

Видимые мощности инженерно-геологических элементов в районе исследований:

- 1) 0.0–0.3 м — асфальтовое покрытие;
- 2) 0.4–1.2 м — насыпные грунты неоднородного состава ИГЭ-1;
- 3) 1.2–3.7 м — насыпные грунты: гравийно-галечники с песчано-суглинистым наполнителем ИГЭ-5;
- 4) 3.7–6.8 м — ледово- и ледниково-морские суглинки ИГЭ-4;

5) ниже — полускальные, малопрочные (глыбошебнистые) грунты, сильно трещиноватые и выветрелые породы с мелкоземом от 10 до 25 % ИГЭ-9;

6) переслаивание скальных и среднепрочных грунтов с мелкоземом до 5–10 % до глубин 11.5–14.6 м ИГЭ-10.

Предположительно ИГЭ-1, ИГЭ-9, ИГЭ-10 являются водовмещающими грунтами временного водоносного горизонта, поэтому они также являются причиной развития оползней, в том числе и от морозобойного растрескивания в зимний период. Обобщая наблюдения, делаем вывод, что в результате повышенного водонасыщения в межсезонье (июнь — сентябрь) происходит массоперенос мелкодисперсных грунтов на более низкие горизонты склоновых площадок в виде разжиженных накоплений.

Целью данных исследований является определение результативности применения пассивных микросейсмических полей для выявления очагов оползневых подвижек в рыхлых и скальных грунтах Шахтерской Набережной г. Воркуты.

Материалы и методы исследований

Нами использовалась широкополосная цифровая сейсмическая станция Zet 048-с в скважинном исполнении. Она предназначена для получения акселерограмм и спектрограмм от различных источников сейсмического воздействия с привязкой GPS на местности. Сейсмоприемник ВС-1313 встроен в станцию с трехосной измерительной системой, с диапазоном частот (по ускорению — 0.3–400 Гц, по скорости — 0.048–63.69 Гц, по смещению — 0.0076–10.14 Гц) (рис. 2). Номинальная чувствительность — 0.5 В/(м/с²), максимально измеряемое значение ускорения — 5 м/с². Интегральный шум в рабочем диапазоне частот — не более 4×10^{-5} м/с².

При расчетах важно учитывать взаимосвязь виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Если обозначим амплитуду виброускорения — А, виброскорости — V, виброперемещения — S, тогда: $A = S \times (2\pi f)^2 / 10^3$, $V = S \times 2\pi f / 10$, $S = A \times 10^3 / (2\pi f)^2$, где f — частота в Гц, S — виброперемещение в мм, V — виброскорость в см/с, А — виброускорение в м/с². Перечень рабочих программ для выполнения сейсмических измерений: узкополосный спектр, виброметр (виброускорение (м/с²), виброско-

Рис. 2. Соотношение частотных составляющих ускорения (а), скорости (b) и смещения (с) для одного и того же исходного сигнала

Fig. 2. The ratio of the frequency components of acceleration (a), speed (b) and displacement (c) for the same source signal

рость (мм/с) и виброперемещение (мм), обнаружитель микросейсмических событий STA/LTA и др.

Перед полевыми работами было проведено моделирование микросейсмических процессов с помощью сейсмической аппаратуры на искусственно созданном двухслойном разрезе из материала ОСБ с наклоном 10°, где с помощью динамометра были определены коэффициенты силы трения при движении акселерометра весом 4.8 кг вниз по склону: доска ОСБ + замша = 0.265 (модель 1), ОСБ + масло = 0.143 (модель 2), ОСБ + брезент = 0.214 (модель 3) (рис. 3).

Проведенный эксперимент показал, что в момент движения акселерометра вниз при наличии в промежуточном слое трения скольжения волновая форма акселерограмм и преобладающих частот спектра движения существенно меняется. Оказалось, что АЧХ зависит прежде всего от вида материала наполнения промежуточного слоя. Исходя из этого, определение механизмов

Рис. 3. Акселерограммы и спектрограммы смоделированных микротектонических процессов (a_x , a_y , a_z — компоненты ускорений)

Fig. 3. Accelerograms and spectrograms of simulated microtectonic processes (a_x , a_y , a_z — acceleration components)

развития оползней на основе микросейсмических процессов как в скальных, так и в рыхлых отложениях вполне реально, т. к. регистрация акселерограмм и спектрограмм позволяет по волновой картине определить микротектонические процессы как упругого, так и неупругого действия.

Для определения главного направления вектора движения, представляющего собой пакет объемных волн, этот вектор и плоскополяризованную поперечную волну, идущую по поверхности раздела скального и рыхлого грунта, следует разложить на три плоскости проекции: OXY, OXZ, OYZ (рис. 4, а, б, в), где ось OX направлена в сторону падения склона — на север; ось OY — под углом 90° к нему — на запад; ось OZ — перпендикулярно плоскости OXY — вниз.

Таким образом, после проецирования прямой волны в трехмерном пространстве появляется возможность определить азимут направления главного вектора микро-

тектонического смещения грунтовых масс. Непрерывные измерения позволяют отслеживать все волновые формы акселерограмм и спектрограмм местных микросейсмических процессов в условиях как однородных грунтов (скальных), так и в сложных — неоднородных (рыхлых, пластичных, полускальных) в online. Подобные измерения позволяют решить ряд научно-практических задач на данном объекте исследований, связанных:

- с морозобойным растрескиванием в многолетне-мерзлых и сезонно промерзающих породах, где частота и форма трещин зависит от температурного режима и реологических свойств мерзлого грунта;

- повторным попаданием воды в трещины с последующим замерзанием ее в виде ледяных жилок, по которым будут происходить дальнейшие растрескивания;

- оттаиванием пластичного грунта с последующим его микротектоническим выдавливанием за счет воздействия вышележащих масс;

Рис. 4. Разложение амплитуды упругой волны: а — в одной плоскости проекции; б — в ортогональных плоскостях проекции (OXY, OYZ, OZX); в — проекции амплитуды волны в трех плоскостях

Fig. 4. Decomposition of the wave amplitude: а — in one plane of projection; б — orthogonal projection planes (OXY, OYZ, OZX); в — the projection of the wave amplitude in three planes

— смещением грунтов в результате срыва целостных блоков, включающих в себя: скальные, полускальные, рыхлые, пластичные и вязкопластичные грунтовые массы [5].

Ранее проведенными нами специальными сейсмическими работами с помощью искусственно наведенного удара под углом 45° для возбуждения поперечной волны в пределах мощности 3–5 метров были определены частотные характеристики грунтовых толщ. Общеизвестно, что любая слоистая геологическая среда обладает собственной частотной характеристикой, где спектральные максимумы амплитуд указывают на слоистость разреза. То есть среда обладает частотно-избирательными свойствами, которые определяются отражениями от наиболее контрастных границ. Из этого следует, что в данной среде присутствуют источники сигнала — передаточная среда (фильтр частоты), отражающая горизонт, желательна скальный. Мы определили, что наиболее выраженные группировки максимумов находятся в районе частот: для глин и суглинков — 28.1–36.7 Гц по ускорению или 0.7–0.93 Гц по смещению, для супесей и песков — 31.8–52.2 Гц по ускорению и 0.81–1.32 Гц по смещению, для полускальных грунтов 180–240 Гц по ускорению и 4.56–6.09 Гц по смещению, для скальных и мерзлых грунтов 320–350 Гц по ускорению и 7.43–8.87 Гц по смещению [1, 2]. Таким образом, зная особенности соотношения слоев местного геологического разреза в момент регистрации амплитудно-частотного спектра, получили возможность определить разновидность грунта, вовлеченного в микротектонический процесс (рис. 5).

На основе совместного анализа акселерограмм и спектрограмм, где форма акселерограмм указывает на степень диссипативности среды, а частотные составляющие — на литологическое содержание разреза, мы получили возможность дифференцировать виды смещения грунтовых масс на каждом пикете:

рк 1-1) в условиях движения рыхлых масс по поверхности скальных и полускальных грунтов в плоскости поляризации OXY на 1 пк (пр 1);

рк 1-2) в условиях динамики пластичных грунтов — «сплыва» (выдавливание пластичного материала в горизонтальной плоскости поляризации OXY) на 1 пк (пр 1);

рк 1-3) в условиях движения рыхлых грунтов в плоскости поляризации OXY и в полускальных породах в вертикальной плоскости OZX на 1 пк (пр 1);

рк 2-1) в условиях растрескивания в скальном грунте в вертикальной плоскости OZX на 2 пк (пр 2);

рк 2-2) в условиях движения пластичных грунтов — «сплыва» (выдавливание пластичного материала в горизонтальной плоскости поляризации OXY) на 2 пк (пр 2);

рк 2-3) в условиях движения пластичного грунта поверх полускальных грунтов (выдавливание пластичного материала в горизонтальной плоскости поляризации OXY) на 2 пк (пр 2);

рк 3-1) в условиях движения пластичных грунтов поверх твердых суглинков, на что указывает левая часть спектрограмм OXY на 3 пк (пр 3);

рк 4-1) в условиях скола и микросмещения в скальных и в полускальных грунтах, на что указывает правая часть спектрограммы с частотами 300–400 Гц в вертикальной плоскости OZX на 4 пк (пр 4).

Рис. 5. Разновидности акселерограмм и спектрограмм в зависимости от микротектонических условий в очаговых зонах оползней

Fig. 5. Varieties of accelerograms and spectrograms depending on microtectonic conditions in focal zones of landslides

В соответствии с геологическими данными мы установили, что спектральные составляющие с наибольшей амплитудой расположены на участках с относительно низкими частотами в глинах и суглинках ИГЭ-4, чуть правее — в песках и супесях ИГЭ-1, в средней части — в полускальных грунтах ИГЭ-9, в крайней правой части — в скальных грунтах ИГЭ-10.

Заключение

Таким образом, для оперативного выяснения первичной степени устойчивости склона при возможных негативных инициирующих процессах внутри грунтовых масс следует применять пассивные сейсмические наблюдения. С помощью такого рода мониторинга будут зафиксированы моменты формирования оползневых тел при первых же микротектонических подвижках, в дальнейшем охватывающих все большие диапазоны гравитационных сдвигов грунта в online. Если эти процессы будут продолжаться, а не затухать, то на каком-то этапе появится возможность использования геодезических методов, позволяющих отслеживать линейные и нелинейные смещения в пространстве на протяжении нескольких месяцев или даже нескольких лет. По нашему мнению, такой подход к решению задач, связанных с оползневыми процессами, наиболее перспективен и дает возможность определить момент необходимости начать противооползневые мероприятия.

Литература

1. Лютов В. А. Акселерограммы сильных движений для г. Сыктывкара // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 11. С. 12—21.
2. Лютов В. А., Вихоть А. Н., Лютова Н. В. Изучение оползней геофизическими методами // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2013. № 10. С. 21—23.
3. Маслов А. Д., Осадчая Г. Г., Тумель Н. В., Шполянская Н. А. Основы геокриологии: учебное пособие / Институт управления, информации и бизнеса. Ухта, 2005. 176 с.: ил.
4. Носкова Н. Н. Новые данные о сейсмичности северной части Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3. С. 3—12.

5. Симонян В. В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами. М.: МГСУ, 2011. 172 с.

6. Хогоев Е. А., Колесников Ю. И. Применение сейсмоэмиссионной томографии для геодинамически активных зон // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 59—65.

7. СП 420. 1325800.2018. Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования. М., 2019. 40 с.

References

1. Lyutov V. A. *Akselerogrammy silnykh dvizhenii dlya g. Syktyvkara* (Accelerograms of strong movements for the city of Syktyvkar). Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2018, No. 11, pp. 12—21.
2. Lyutov V. A., Vikhot A. N., Lutoeva V. A. *Izuchenie opolznei geofizicheskimi metodami* (Studying landslides by geophysical methods). Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2013, No. 10, pp. 21—23.
3. Maslov A. D., Osadchaya G. G., Tumel N. V., Shpolyanskaya N. A. *Osnovy geokriologii: uchebnoe posobie* (Fundamentals of geocryology: textbook). Ukhta: Institute of Management, Information and Business, 2005, 176 p.
4. Noskova N. N. *Novye dannye o seismichnosti severnoi chasti Urala* (New data on the seismicity of the northern part of the Urals). Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2016, No. 3, pp. 3—12.
5. Simonyan V. V. *Izuchenie opolznevyyh protsessov geodezicheskimi metodami* (The study of landslide processes by geodetic methods). Moscow: MSU, 2011, 172 p.
6. Hogojev E. A., Kolesnikov Yu. I. *Primenenie seismoe-missionnoi tomografii dlya geodinamicheski aktivnykh zon* (Application of seismic emission tomography for geodynamically active zones). Seismic exploration technologies, 2011, No. 1, pp. 59—65.
7. BR 420. 1325800.2018. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva v raionakh razvitiya opolznevyyh protsessov. Obschie trebovaniya*. (Engineering researches for construction in the areas of development of landscape processes. General requirements). Moscow, 2019, 40 p.

Поступила в редакцию / Received 25.11.19