

А. С. Сердюков¹✉, Т. В. Шилова¹, Н. Е. Бирючков¹

Исследование сезонного промерзания грунтов методом поверхностных сейсмических волн

¹Институт горного дела им. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru

Аннотация. В статье экспериментально апробирован метод поверхностных волн для выявления участков сезонного промерзания грунтов. Сезонное промерзание осложняет ведение горных работ: снижает устойчивость бортов карьеров и откосов отвалов, деформирует транспортные пути (морозное пучение), затрудняет буровзрывные работы и нарушает работу дренажных систем. Исследования проведены на модельном объекте с контролируемыми условиями: была сформирована яма, заполненная супесью, подверженной промерзанию и морозному пучению. Сейсморазведочные наблюдения позволили выявить зону промерзания в массиве грунта. Результаты подтверждают перспективность метода поверхностных волн для мониторинга сезонного промерзания при планировании и ведении горных работ, что способствует снижению рисков и повышению безопасности эксплуатации инженерных и транспортных объектов в зимний период.

Ключевые слова: сезонное промерзание, инженерная сейсморазведка, метод поверхностных волн

A. S. Serdyukov¹✉, T. V. Shilova¹, N. E. Biruchkov¹

Study of seasonal soil freezing using surface seismic waves

¹Chinakal Institute of Mining, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru

Abstract. This article experimentally tests a surface wave method for identifying areas of seasonal soil freezing. Seasonal freezing complicates mining operations: it reduces the stability of quarry walls and waste heap slopes, deforms transport routes (frost heave), impedes drilling and blasting operations, and disrupts drainage systems. Accurately determining the boundaries of the frozen layer is essential for safe and efficient deposit development. The study was conducted on a model site under controlled conditions: a pit filled with sandy loam susceptible to freezing and frost heaving was dug. Seismic observations revealed freezing in the soil mass. The results confirm the potential of the surface wave method for monitoring seasonal freezing during mining planning and execution, which helps reduce risks and improve the safety of utility and transport facilities during the winter.

Keywords: seasonal permafrost, engineering seismic exploration, MASW

Введение

Сезонное промерзание грунтов – широко распространённое природное явление на значительной части территории России, существенно влияющее на устойчивость сооружений и технологические процессы в горном деле. В криолитозоне промерзание и морозное пучение провоцируют деформации бортов карьеров, откосов отвалов и инфраструктуры, повышая риски аварий [1,2]. Традиционные методы оценки

промерзания, такие как буровые работы и термометрия, отличаются высокой трудоёмкостью и не позволяют оперативно отслеживать динамику изменений на больших площадях, из-за чего возрастает потребность в дистанционных геофизических методах, в том числе методе поверхностных волн (MASW) [3]. Для обработки данных сейсморазведки в работе использовано частотно-временное S-преобразование сейсмических записей [4,5]. Этот метод обеспечивает высокое разрешение при анализе нестационарных сигналов и в совокупности с методом главных компонент позволяет нам выделять полезные волны на фоне помех и точно определять изменения свойств грунта, связанные с промерзанием. Драгой важной задачей, решенной нами, являлась разработка и апробация собственной регистрирующей аппаратуры: наш регистратор существенно дешевле серийных аналогов и при этом обладает широкими возможностями настройки – в частности, позволяет регулировать параметры усиления и режимы записи под конкретные условия измерений. Для экспериментальной апробации методики и аппаратуры нами был создан модельный объект: яма с контролируемыми условиями промерзания, заполненная супесью, склонной к морозному пучению. Проведенные эксперименты демонстрируют возможность надёжного выявления зоны промерзания в толще грунта. Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность метода поверхностных волн для мониторинга сезонного промерзания при планировании и ведении горных работ, что способствует снижению рисков и повышению безопасности эксплуатации инженерных и транспортных объектов в зимний период.

Методика и аппаратура

Методика обработки сейсмических данных поверхностных волн основана на применении частотно-временного S-преобразования:

$$S[h(t)](\tau, f, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-t)f^2}{2\sigma^2}} h(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

Модель поверхностно-волнового пакета в рассматриваемой области выражается в виде формулы:

$$q(x, \tau, f) = Q(f, \tau - x / u(f)) P(f, x)$$

Задача фильтрации сводится к поиску функций таких функций u , P и Q чтобы минимизировать невязку между моделью и наблюдаемым частотно-временным представлением данных

$$\sum_{n=1}^N \int_0^T [g(x_n, \tau, f) - q(x_n, \tau, f)]^2 d\tau \rightarrow \min$$

Эта минимизация проводится с применением метода главных компонент и перебора всевозможных значений групповой скорости u . Для осуществления экспериментов в Лаборатории физических методов воздействия на массив

горных пород ИГД СО РАН была разработана регистрирующая аппаратура, представленная на схеме приведенной на рис.1.

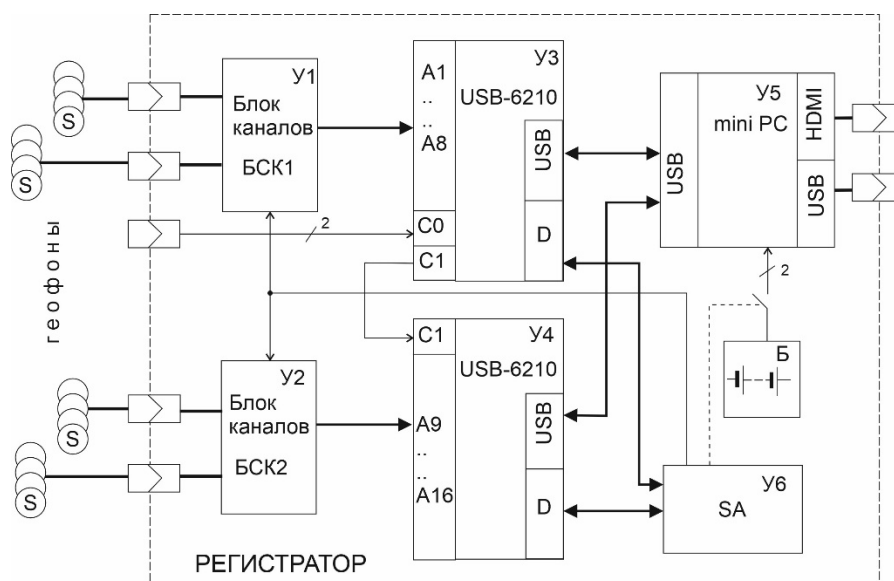


Рис. 1. Схема регистратора

В состав станции входят мини компьютер на базе процессора N100 с предустановленным пакетом программ LabView, два многофункциональных устройства сбора данных USB-6210 (National Instruments, США), аккумуляторный блок питания, корпус, оснащенный переключателями и электрическими разъемами. Основные параметры регистратора: число каналов – 16 (дифференциальные); разрядность аналого-цифрового преобразователя – 16 бит; диапазон амплитуд регистрируемых сигналов – регулируемый: 2 мВ, 10 мВ, 50 мВ, 100 мВ, 200 мВ, 1 В, 5 В, 10В; частота дискретизации (максимальная) – 25 кГц (шаг дискретизации 40 мкс); потребляемая мощность 12 Вт; автономность – 16 час (32 час при двойной батарее); Большой набор диапазонов амплитуды входных сигналов компенсирует относительно низкую разрядность АЦП и позволяет подстраивать регистратор под конкретные условия приема сейсмических сигналов, генерируемых виброисточником. Предусмотрен контроль превышения допустимого уровня с включением, при необходимости, режима автоматического регулирования чувствительности приемных каналов. Предусмотрена возможность подключения внешнего монитора для визуализации регистрируемых сейсмограмм.

Эксперимент и его результаты

Был подготовлен участок с целью проведения натурных испытаний для изучения сезонных изменений свойств пучинистого грунта. Подготовка участка включала:

- формирование ямы размерами около 1,9 х 1,7 х 5 м (глубина х ширина х длина), дно которой покрывали гидроизоляционной пленкой;

– заполнение пучинистым грунтом, уплотнение породы. Для создания опытно-полевого участка по результатам лабораторных экспериментов были выбраны песчанистые супеси как наиболее подходящие, доступные, характерные для местности исследования грунты;

– подготовку сейсмической аппаратуры и измерительной полевой станции

Система наблюдения представляет собой 15 сейсмических датчиков – геофонов GS-one с собственной частотой 5 Гц. Источники расставлялись вдоль линии, пересекающую яму с супесью в поперечном направлении (см. рис.2)

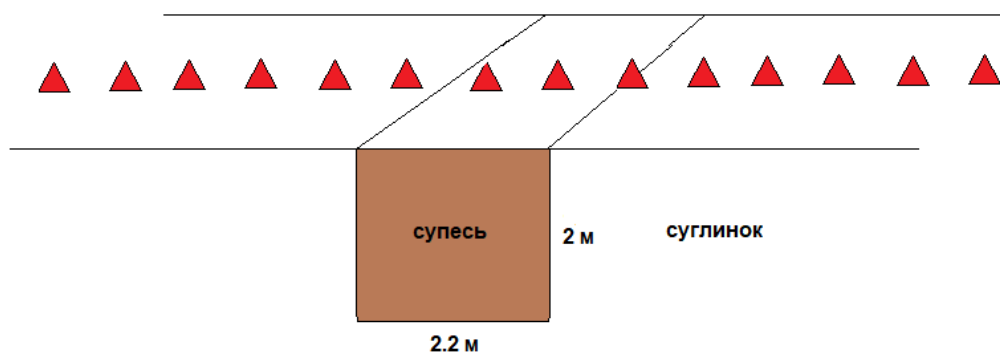


Рис. 2. Схема натурного эксперимента

Полученные сейсмические данные (сейсмограммы) представлены на рис. 3а. Результат после применения алгоритма фильтрации показан на рис 3.б. Дальнейшая обработка данных заключалась в исследовании частотно-временных представлений (псевдосейсмограмм полученных при помощи S-преобразования) на различной частоте. На достаточно высоких частотах (см. рис.4.) хорошо прослеживается аномалия распределения спектральных амплитуд в области ямы с супесью, что позволяет выделить данную аномалию на практике.

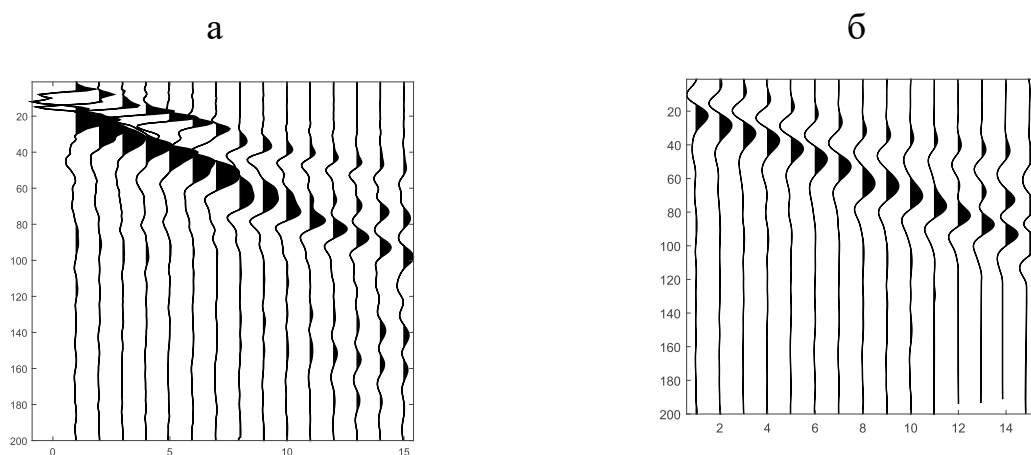


Рис. 3. Исходные данные (а) и после применения фильтрации (б)

Заключение

Проведенные эксперименты демонстрируют возможность надёжного выявления зоны промерзания в толще грунта. Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность метода поверхностных волн для мониторинга сезонного промерзания при планировании и ведении горных работ, что способствует снижению рисков и повышению безопасности эксплуатации инженерных и транспортных объектов в зимний период.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Ершов Э. Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.
2. Трофимов В. Т., Бадю Ю. Б., Дубиков Г. И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. – М.: Наука, 1983. – 245 с.
3. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64, No. 3. – P. 800–808.
4. Castellanos A., Santamarina J. C. Time-frequency analysis of surface waves: enhancing dispersion curve extraction // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2005. – Vol. 10, No. 2. – P. 137–146.
5. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. – 2019. – Vol. 84, No. 1. – P. A19–A24.

© А. С. Сердюков, Т. В. Шилова, Н. Е. Сердюков, 2026