

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЛОТИН ГЭС, ПОСТРОЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

А.П. Ермаков<sup>1</sup>, М.Л. Владов<sup>1</sup>, С.А. Великин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, тел. (495)939-12-30,  
[ermakov@geol.msu.ru](mailto:ermakov@geol.msu.ru)

<sup>2</sup>Виллойская научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения СО РАН, 678185, Республика Саха (Якутия), п. Чернышевский, ВНИМС, тел. (41136)7-34-34,  
[frozen@mirny.sakha.ru](mailto:frozen@mirny.sakha.ru)

## Введение.

Гидроэлектростанции на плотинах, построенные на основании в условиях вечной мерзлоты, являются основным источником электроэнергии в республике Саха (Якутия). Для развития этого региона, во многом связанного с деятельностью АК «АЛРОСА», с каждым годом требуется все больше электроэнергии. В то же время каждая из плотин, построенная в условиях развития многолетнемерзлых пород, является уникальным сооружением.

В процессе строительства и эксплуатации плотин возникают неоднократные аварийные ситуации, связанные с появлением трещин в теле плотины с угрозой последующего отрыва. Такого рода трещины и ослабленные зоны связываются, как правило, с деградацией многолетнемерзлых пород, слагающие основание плотины, а также оползневые процессы, развитые вдоль бортов долины реки, на которой построена ГЭС. Как следствие, зоны деградированной вечной мерзлоты могут являться основными каналами начальной фильтрации вод в обход насыпной плотины.

В этих условиях актуальным является контроль состояния плотины. Среди множества разнообразных методов ведения такого контроля (скважинные наблюдения, термометрия и т.д.) важным является выбор комплекса неразрушающих геофизических методов, по крайней мере, как дополнение к существующим. Одним из таких методов является сейсморазведка на поверхности и в скважинах.

В данной работе рассмотрен пример применения сейсморазведки для изучения строения тела плотины и мониторинга ее состояния на одной из ГЭС в Якутии.

## Геологическая обстановка долины реки Виллой.

В геологическом разрезе бортов долины принимают участие четвертичные отложения и коренные породы, вовлеченные в оползневые дислокации. Оползневые образования представлены следующими породами: долеритами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, доломитами, известняками, мергелями.

В оползневых телах отмечаются многочисленные трещины разуплотнения, развитые по трещинам напластования и отдельности.

На левом борту долины особую группу трещин представляют гравитационные трещины отрыва, которые формируются в мерзлом массиве предположительно и в настоящее время.

Трещины отрыва простираются субпараллельно борту долины р. Вилюй и при выдержанном в общем простирании они могут быть прерывистыми, иметь кулисообразное строение и сообщаться между собой.

Трещины отрыва характеризуются в основном крутыми (80- 90 градусов) углами падения и большой протяженностью. Раскрытие трещин в среднем 0.1-0.2 м, но отмечаются и более крупные - шириной до 0.8 м.

Трещины частично пустотелые, частично заполнены льдом и солифлюкционным материалом.

#### **Аппаратура и методика полевых сейсмических наблюдений.**

При полевых сейсморазведочных наблюдениях была использована цифровая 24-х канальная сейсмическая станция “SUMMIT Compact” (компания DMT, Германия). Прием сейсмических S-волн осуществлялся горизонтальными сейсмоприемниками фирмы OYO-Geospace с центральной частотой 10 Гц, которые, в свою очередь, подключались к 22-х канальной сейсмической косе. Сигнал, поступающий с сейсмической косы, передавался на сейсмостанцию “SUMMIT Compact”, где он оцифровывался, усиливался и далее выводился на монитор полевого компьютера.

Сейсмические наблюдения проводились вдоль профилей. Длина приемной линии составляла 105 метров при шаге между каналами 5 метров. Полевые сейсмические наблюдения проводились по методике общей глубинной точки (МОГТ) на отраженных волнах. При такой методике возбуждение сейсмической волны осуществляется на каждом канале – пункте приема (ПП) при регистрации сигнала всеми ПП. Далее формируются сейсмограммы общей глубинной точки (сейсмограммы ОГТ), являющейся комбинацией всех возможных трасс от одной точки отражения. За счет многократных отражений от одной точки, метод ОГТ позволяет значительно улучшить отношение сигнал/помеха, увеличить амплитуду отраженных волн от глубинных частей разреза (т.е. увеличить глубину исследований), избавиться от возможных кратных отражений.

Возбуждение сейсмических волн осуществлялось с помощью кувалды весом 7 кг по металлической плашке под углом около 45 градусов вкост направлению профиля (расстановки). Такой способ возбуждения сейсмических волн позволяет получить поперечную S-волну, которая далее регистрируется на поверхности горизонтальными сейсмоприемниками.

Для увеличения кратности на крайних каналах расстановки использовались дополнительные (выносные) пункты возбуждения (ПВ) - по 5 ПВ слева и справа от расстановки. Шаг между выносными ПВ составлял 5 метров и был равен шагу ПВ вдоль приемной линии. Т.е. в пределах расстановки ПВ совпадали с ПП.

Регистрация сейсмических событий проводилась в течение 512 мс при частоте дискретизации 1 мс. Итоговые полевые сейсмические данные (сейсмограммы) записывались в формате SEG-2.

### **Возможности и ограничения использования отраженных и преломленных S-волн.**

При методике ОГТ волновое поле на полевых сейсмограммах представляет собой довольно сложную картину наложения различных волн: прямой, поверхностной, отраженных и преломленных. Среди них для изучения глубинного строения среды и ее физических свойств, чаще всего, используются отраженные и преломленные волны.

Преломленные волны, в зависимости от скоростной характеристики исследуемой среды, могут проникать на различные глубины. При этом часто наблюдается зависимость: чем больше скорость в среде, тем меньше глубина проникновения преломленных волн. Для района работ с повсеместным развитием ММП скорости сейсмических волн могут быть до двух раз больше, чем в аналогичных породах, но в талом состоянии. По результатам сейсморазведочных работ 2006 года глубинность разрезов, построенных по преломленным S-волнам, составила 15-20 метров [1] Глубинность разрезов, построенных по P-волнам, как правило, не превышала 10 метров. Таким образом, с помощью преломленных волн оказывается возможным изучить только первые 20 метров разреза.

В то же время, информация о скоростных свойствах среды в верхней части разреза оказывается часто крайне полезной. Например, наблюдения за изменением скорости сейсмических волн в разное время года, или в разные года, позволяет судить о глубине протайки. Кроме того, поскольку преломленные волны позволяют получить информацию о скоростях P и S-волн, появляется возможность перехода к их отношению  $V_s/V_p$  и, как следствие, к упругим модулям: коэффициенту Пуассона, модулю Юнга, модулю сдвига и т.д. Т.е. к тем самым параметрам, необходимые для оценки упругих и прочностных свойств насыпной плотины. Для района работ отношение  $V_s/V_p$  имеет довольно высокие значения. Например, для глубины 10 метров - максимальной глубины проникновения преломленных P-волн, эта величина составляет 0,65.

Информацию о глубинном строении объекта исследований позволяют получить отраженные волны, поскольку их глубина проникновения много меньше зависит от скоростей в среде, как случае преломленных волн. Здесь решающую роль играет свойство среды поглощать сейсмические волны, а также контрастность разреза по скорости и плотности в породах.

Полученный материал 2007 года позволяет говорить о глубинах более 250 метров. Такая глубина будет соответствовать уже скальному основанию плотины и, соответственно, полностью удовлетворяет требованию необходимой глубинности. На временных разрезах, полученных с помощью отраженных волн, достаточно уверенно прослеживаются несколько осей синфазности отраженных волн, каждая из которых соответствует некоторой границе отражения в теле плотины. Идентификация выделенных осей

синфазности является особой задачей, поскольку большинство имеющиеся на скважин имеют глубину 40 - 80 метров.

Одной из серьезных проблем сейсмических исследований на ГЭС является высокий уровень регулярного и случайного шума. Главным образом это работающие механизмы, тяжелая техника, а также непосредственно сама ГЭС. Последняя является источником весьма интенсивной и регулярной помехи с центральной частотой 10-20 Гц. Частично эту помеху удаются подавить на этапе обработки сейсмических данных. Подавление этой помехи на этапе полевых работ обеспечивается выбором методики наблюдений (в нашем случае МОГТ), по мере возможности, выбором расположения приемной линии/профиля относительно источника шума (главного здания ГЭС) и накоплением полезного регулярного сигнала для усиления отражений от глубоких границ.

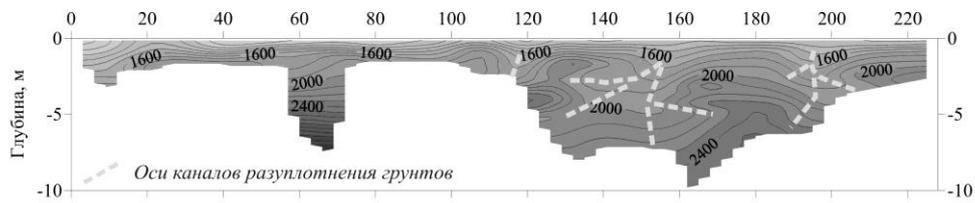
Необходимо отметить, что проведенные исследования следует отнести к разряду многоволновых. Для изучения приповерхностной части разреза используются преломленные (рефрагированные) волны первых вступлений. Для изучения строения глубоких частей среды используются отраженные волны в последующих вступлениях. На рис. 1 (а, б) представлены разрезы по одному из профилей в изолиниях скорости Р (вверху) и S-волн (внизу), полученные методом однородных функций [2]. Светлые области и пунктирные линии в них - возможные ослабленные зоны и каналы разуплотнения соответственно. Цифрами на разрезах показаны значения Р и S-волн. На рис. 1 (в) представлен временной разрез по одному длинному профилю, построенный по отраженным волнам. На разрезе по осям синфазности отраженных волн выделены границы раздела в теле плотины. На рис. 1 (в) они показаны сплошными линиями. Области, ограниченные пунктирной линией – возможные ослабленные зоны.

#### **Выводы.**

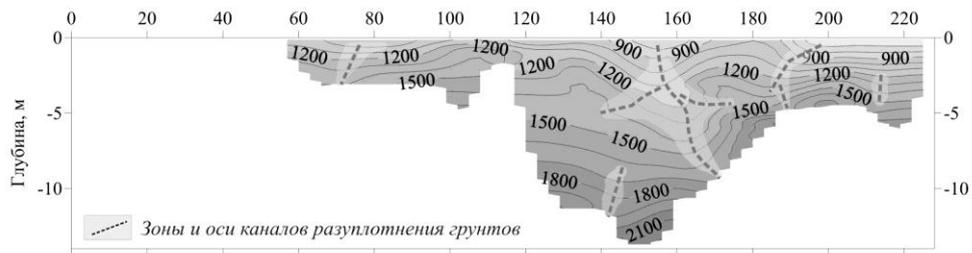
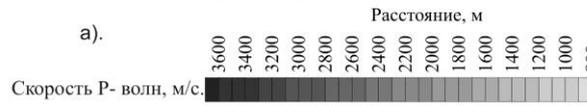
1. Опытные-методические работы показали устойчивую связь характеристик волнового поля и строения (состояния) тела плотины;
2. Сейсмические исследования обладают сравнительно высокой производительностью и могут быть рекомендованы для наблюдений в режиме мониторинга – особенно, для изучения изменений в строении и свойствах среды (геометрия границ, интенсивность волн разных типов и т.д.) в приповерхностной части разреза.

#### *Литература*

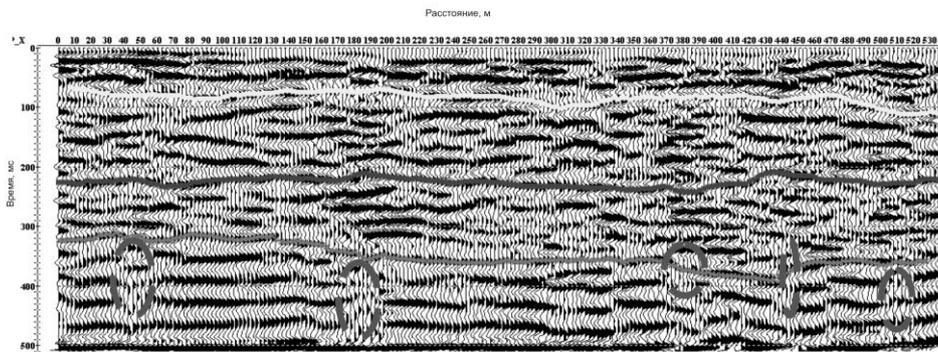
1. Савельев Н.П., Ермаков А.П. Использование сейсморазведки для мониторинга плотин на примере Вилюйской ГЭС-3 // Материалы докладов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» 11 - 14 апреля 2007 года. М. 2007.
2. Pijp V.B. 2D inversion of refraction travelttime curves using homogeneous functions // Geophysical Prospecting, 2001. P. 461-482.



а).



б).



в).

Рис. 1. На рисунке показаны:

Сейсмические разрезы в изолиниях скорости преломленной Р-волны (а) и преломленной S-волны (б) по профилю №4, построенный методом однородных функций [3]. Сечение изолиний 100 м/с. Светлые области и пунктирные линии в них -возможные ослабленные зоны и зоны разуплотнения соответственно. Временной разрез (в), построенный по отраженным волнам. Линиями на разрезе показаны границы раздела в среде, выделенные по осям синфазности отраженных волн. Области, ограниченные пунктирной линией - возможные ослабленные зоны.