

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МАССИВА ПОРОД В КРИОЛИТОЗОНЕ МЕТОДАМИ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМИКИ ПО ДАННЫМ ТЕХНОГЕННЫХ МИКРОСЕЙСМ НА ПРИМЕРЕ ВИЛЮЙСКОЙ ГЭС.

На примере Вилюйской ВГЭС-1\2 предложен сейсмический способ оценки инженерно-геологического строения среды по данным техногенных микросейсм, не требующий применения ударных или взрывных источников, что значительно повышает экономичность сейсмических работ в криолитозоне. После модификаций метод может быть применен при геологоразведочных работах.

Введение

Использование микросейсм в настоящее время получило широкий характер - методы АНЧАР, ИГЛА выявления флюидонасыщенных пластов, анализ качества сейсмограмм ОГТ, мониторинг землетрясений и состояния разломных зон, мониторинг в градостроительной сфере [6] и т.п.

В данной работе излагаются результаты в области структурной сейсмики по использованию волнового поля от работающих гидротурбинных агрегатов Вилюйской ГЭС-1\2 как сейсмического специфического источника с целью идентификации инженерно-геологического строения скального массива расположения ГТС. В аспекте инженерной сейсмики на гидроузлах РФ, существует необходимость контроля развивающихся русел обходной фильтрации на участках береговых примыканий плотин этих гидроузлов. Здесь одним из основных является вопрос фильтрационной устойчивости массивов горных пород, инженерно-геокриологические аспекты которого детально освещены в монографии [9]. Однако при всей глубине охвата проблемы, тематика данной классической работы ограничена геотехническими рамками, а геофизические, в частности сейсмические подходы, не рассматривались. Результаты многолетнего опыта применения инженерной сейсмики, в т. ч. в криолитозоне представлены, например в [1,2].

Инженерно-геологическая ситуация

Геология правобережного примыкания ВГЭС-1\2 представлена трапповым полем с включениями ксенолитов. Интрузия долеритов представляет собой, в основном, пластовое тело мощностью более 200м, залегающее согласно с вмещающими породами. Интрузия включает в себя множество мелких и одно крупное включение сильнольдистого карбонатного ксенолита [7,10], имеющего проявления на дневной поверхности (рис.1а) и значительную общую протяженность вдоль правобережного примыкания (по материалам

[11]). На рис.1в представлена геологическая схема ксенолита в поперечном сечении по скважинному профилю скв. 75-78 [11]. Здесь пунктиром обозначен только общий внешний контур, т.к. структура ксенолита неизвестна, в частности он может быть пронизан секущими трапповой интрузии различного масштаба.

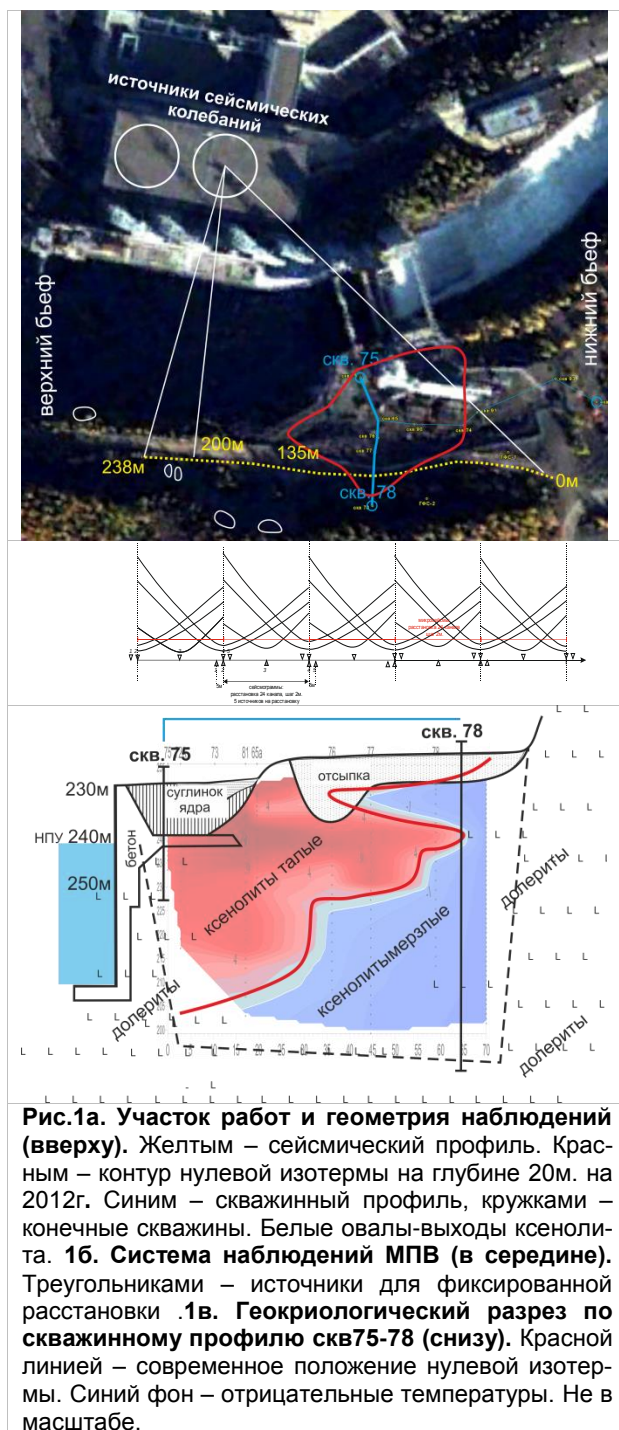
С 1996 года на данном участке развивается техногенный талик с сопутствующим развитием основного русла обходной фильтрации (вдоль стенки водоподводящего канала), коллектором которой являются растепленные породы ксенолита (рис.1в). В настоящее время талик активно развивается в направлении скв. 78 (по материалам [12]). Основной талик контролируется скважинной сетью, а его развивающееся крыло – скважиной №78. На рис.1а синим показан скважинный полигон, красным показано положение нулевой изотермы в плане по состоянию на 2012г. На геологическую схему 1в наложен температурный профиль по состоянию на август 2012г [12]. Здесь красной линией показано современное глубинное положение нулевой изотермы в разрезе на этот же момент, что и в плане.

Для дальнейших ссылок отметим, что основной (активный) интервал абс. отметок развития талика составляет 245-255м с кровлей на глубине около 10м.

Некоторые инженерно-геологические задачи

Инженерно-геологической задачей было выявление положения формирующегося русла обходной фильтрации. Здесь данная задача решалась методами инженерной сейсмики через выявление глубинного положения ксенолита, которое также должно быть определено сейсмическими методами. При этом конечные сейсмические материалы должны соответствовать заверочным геотермическим данным по талику правобережного примыкания.

В данной работе геомеханический шум



гидротурбин электростанции турбин рассматривается как полноценное волновое поле с конечной целью оценки инженерно-геологического строения массива через его частотные характеристики. Вращающаяся гидротурбина рассматривается как сейсмический источник гармонических преимущественно S-волн с сопутствующим случайным шумом (собственно микросейсмы). Обработка сейсмических волновых полей в спектральной области с целью определения глубинного строения среды с успехом применялась автором при решении задач сейсмиче-

ской миграции [3,8,9]. Изучение микросейсм гидроэлектростанции как самостоятельного объекта проведено в [4,5].

Задачей было также оценить контуры глубинных поглощающих тел в инженерно-геокриологическом окружении ВГЭС-1\2 на основе оценок пространственного распределения спектров.

Последняя задача состояла в получении глубинного мигрированного разреза с инженерно-геокриологической интерпретацией всех полученных результатов.

Общая система наблюдений

На рис. 1а, желтым представлено положение сейсмического профиля на местности и расстояния до источника. Белыми овалами выделены проявления (языки) ксенолита на дневной поверхности, глубинную структуру которого мы хотим выявить по данным регистрируемого поля микросейсм. На профиле были проведены работы методом МПВ с использованием 30гц сейсмоприемников, и ударного источника в виде 7-килограммовой ручной кувалды с накоплением по 10 ударов. Использована единая система наблюдений МПВ (рис.1б) в двух вариантах: получение сейсмограмм Р- и S-волн. В последнем случае поперечные волны возбуждались ударом под углом 45 градусов перпендикулярно профилю. Сейсмоприемники крепились всегда вертикально к дневной поверхности с измерением вертикальной компоненты скорости смещения.

Общая длина системы наблюдений (профиля) составила 238м. Регистрация колебаний велась 24-канальной переносной сейсмостанцией SUMMIT на временах до 0.5 сек с шагом 0.0005 сек. Было использовано пять расстановок 30гц сейсмоприемников по 24 штуки с шагом 2 м без перекрытия, и пять ударных источников на каждую расстановку, схема которых показана на рис.1б. Всего было получено по 25 сейсмограмм МПВ на Р-волнах и SH-волнах соответственно. После проведения работ с ударным источником, по принципу «один к одному» на этих же расстановках было получено пять сейсмограмм микросейсм так, что на каждую расстановку с пятью ударными источниками приходится одна соответствующая расстановка микросейсм с тем же количеством приемников (рис.1б, красным цветом). Сводная сейсмограмма наблюдаемых микросейсм (пять сейсмограмм) приведена на рис.2а.

Работы были спроектированы в предположении, что регистрируемое поле микросейсм относительно однородно в пределах

профиля так, что поглощением поля на этом расстоянии можно пренебречь. Контроль возможного интенсивного затухания поля микросейсм с расстоянием от источника (турбина) вследствие поглощения энергии волн представлен на рис 2б. Здесь горизонтальная линия – удвоенное значение среднего от приведённых максимумов. Как и ожидалось, амплитуда волнового поля максимальна напротив источника (пикет 200м, на рис 2б отмечено красным), однако реального затухания поля с расстоянием на данных масштабах не наблюдается.

Спектральная оценка поля микросейсм

На рис. 2в представлена временная спектральная плотность поля микросейсм на которой зафиксирована линейная полоса несущей частоты постоянного значения 25.391 гц, которая оценивалась как $ps * \frac{1}{(NFT * \Delta t)}$, где Δt – шаг дискретизации по времени, NFT – длина выборки Фурье-преобразования, ps – номер отсчета с данной частотой. Кратные частоты до пикета 150м практически неразличимы и проявляются дискретно. С пикета 150 выделяются кратные частоты и обертоны. Полученная оценка совпадает с формулой кратностей $50/n$ согласно [7,8], n – число полюсов генератора.

На пикете 150м обертоны расположены в более низкочастотной области, а на остальных участках – в более высокочастотной области. Особенности пространственного распределения спектральной плотности отражают характер геологического строения среды распространения поля. В частности, вторая половина профиля проходит по участку проявления на дневной поверхности ксенолитов дисперсных пород (на рис. 1а), которые служат потенциальным коллектором обходной фильтрации [11] и который находится на минимальном удалении от источника микросейсм.

Недостатком стандартного варианта спектральной плотности является невозможность привязать частотные аномалии по интервалам глубин или к временам отражений, что и определяет только качественный характер полученного результата.

Итого, с помощью спектральной оценки, источник волнового поля микросейсм (вращающиеся гидротурбины Вилюйской ГЭС-1/2) определен как 25гц источник гармонических P/S-волн, и для 30гц сейсμοприемников получено экспериментальное подтверждение проявления кратных частот и

обертонов монохромного сейсмического волнового поля; получено пространственное распределение этих частот после прохождения неоднородной геологической среды. В [8,9] при решении инженерно-сейсмологических задач, свойства среды оценивались по коэффициенту поглощения путем отслеживания амплитуды фиксированной гармоники на различных удалениях сейсмостанции от источника.

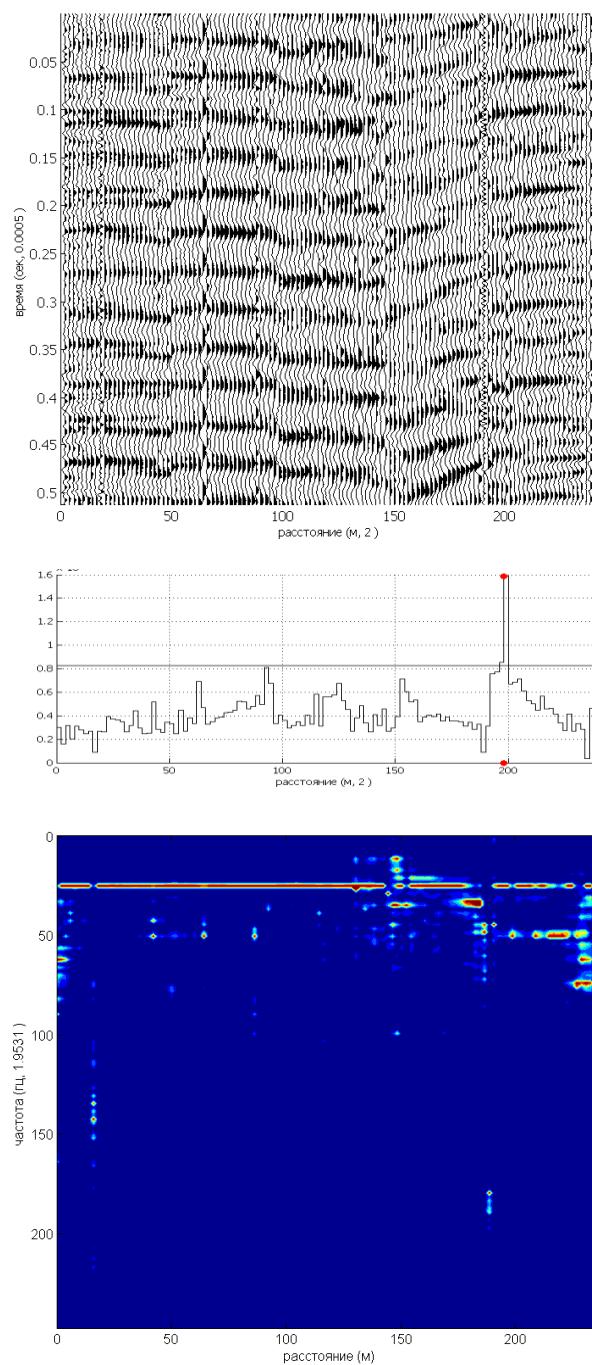


Рис. 2. Сводная сейсмограмма микросейсм (2а, сверху). Распределение максимумов трасс вдоль профиля (2б, в середине). Нормированная временная спектральная плотность волнового поля (2в, внизу)

Частотно-временной анализ микросейсм

Для преодоления ограничений стандартной спектральной плотности, применялся частотно-временной анализ (например [14]) волнового поля микросейсм. На рис.3а приведена выборочная трасса, на рис.3б по-

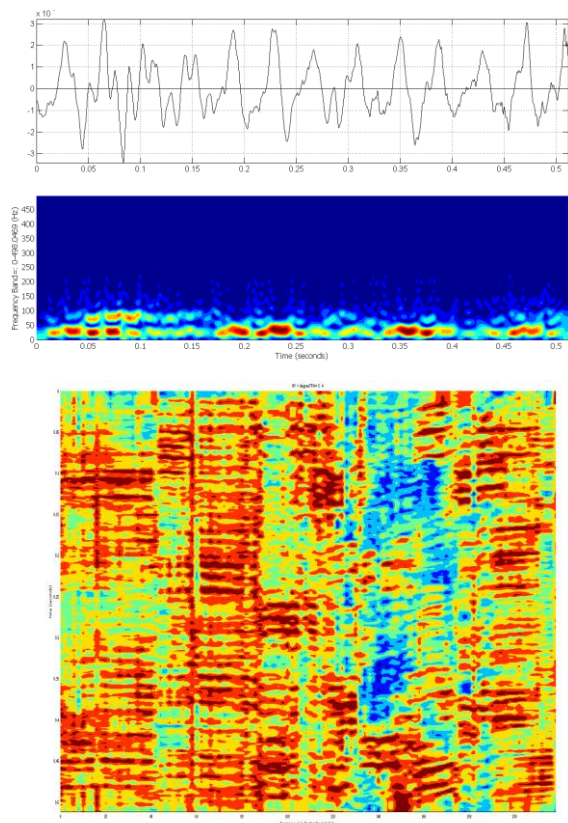


Рис.3. Выборочная трасса микросейсм (3а, сверху) и ее частотно-временной спектр (3б, в середине). Временной разрез $W(x, t)$ по частотно-временному спектру микросейсм $U(x, t; \nu)$ (3в, внизу). Не в масштабе.

казан ее частотно-временной спектр. Обработка проводилась в модификации скользящего окна Хэмминга, к центру которого привязана временная шкала. Однако, на рис.3б для выявления деталей показан вариант прямоугольного окна, которое, как известно, дает более высокое разрешение, однако за счет привнесения доли паразитных частотных осцилляций. Частотно-временной анализ позволяет интерпретатору на шкале времен наблюдений (фактически глубин) локализовать частоты, на которых переносится основная часть энергии поля микросейсм, что и восполняет недостаток предыдущего подхода на основе спектральной плотности. Дополнительно, на рис.3б, на временах 0.05-0.1сек, наблюдаются кратные частоты 25,50 и 100гц, как и на рис.2в. Энергия поля микросейсм целиком сосредоточена в области частот до

100гц и переносится «цугами» волн, которые выделяются на шкале времени как «яркие пятна». Последнее обстоятельство позволяет интерпретировать времена (псевдоглубины) этих цугов как отметки расположения слоев массива пород и их литологических разностей повышенной проводимости упругих волн, вплоть до волноводов.

Временной разрез поглощения волнового поля микросейсм

Хотя методы обработки данных сейсмике с источником и данных микросейсм отличаются принципиально, существуют общие моменты. Исходные сейсмические данные получаются в системе координат (x, t) и обозначаются термином «волновое поле» $U(x, t)$, результат ОГТ-преобразований получается также в системе координат (x, t) и обозначается термином «временной разрез» $W(x, t)$. В частотно-временном анализе микросейсм исходные данные представлены также в пространстве (x, t) , однако здесь объем данных увеличивается до трехмерного куба $U(x, t; \nu)$ где ν — частота оконного Фурье-преобразования. Далее над $U(x, t; \nu)$ было проведено преобразование с суммированием по ν , приводящее к результату опять же в системе координат (x, t) , который, следуя общей практике, обозначим как «временной разрез микросейсм» $W(x, t)$. Причем здесь предполагается применимость классической линейной причинной модели Kjartansson [13] неупругих сред для которой декремент поглощения постоянен во всем спектре частот с известной оценкой дисперсии фазовой скорости как $c_0(\frac{\nu}{\nu_0})^\alpha$. Только в этом ограниченном смысле к $W(x, t)$ далее по тексту применяется термин «временной разрез поглощения микросейсм». С точки зрения обработки данных сейсмике с источником, такое преобразование в некотором смысле аналогично условию визуализации при сейсмической миграции [3, 8, 9].

Полученный нормированный временной разрез микросейсм $W_n(x, t)$ показан на рис. 3в. Здесь $W_n(x, t)$ дополнительно сглаживалось методом локальной регрессии с взвешенными линейными наименьшими квадратами с полиномиальной моделью 2-й степени.

Глубинная миграция волнового поля микросейсм.

Исходными данными для глубинной миграции было то же волновое поле микросейсм гидротурбин, что и для спектральных оценок предыдущего раздела. Препроцессинг

не проводился по причине отсутствия на исходном волновом поле известных феноменов, сопутствующих импульсным источникам.

В отличие от, в целом, нестандартного частотно-временного способа получения временного разреза в предыдущем разделе, здесь применялась фазовая миграция (которая, как частный случай, рассмотрена в [3,8]) в стандартном пространстве пространственно-временных частот, в модификации двумерно-неоднородной кусочной среды. Латеральная аппроксимация неоднородной среды соответствует предположению, что в пределах каждой сейсмограммы микросейсм среда характеризуется постоянной скоростью. По глубине на скоростной закон ограничений не накладывалось. При уменьшении латерального интервала постоянной скорости вдвое, качество результата практически не изменялось.

Скорости миграции определялись автоматически по определенному критерию [3,8]. Качество миграции при таком подходе оценивается по априорной информации, которой в нашем случае являлись геокриологические материалы специализированных работ [11, 12]. Миграция проводилась в диапазоне частот 6-125 гц при значении несущей частоты 25Гц. Шаг по глубине при пересчете поля в глубину выбирался по критерию Релея (относительно минимальной длины волны спектра исходного волнового поля).

На рис.4Б (внизу справа) приведен полученный глубинный мигрированный разрез, на котором высокоамплитудными значениями выделяются скальные и мерзлые породы, а малоамплитудными - участки ксенолита. Согласно разрезу ксенолит имеет сложное строение и состоит из вертикального и горизонтального тела, на которых выделяются участки минимальных амплитуд. Вертикальное тело имеет выходы на дневную поверхность, а подповерхностное горизонтальное тело полого падения простирается из верхнего в нижний бьеф и имеет в нем выходы на поверхность, что согласуется с геологическими материалами [11,12] о простирании ксенолита вдоль правого берега р. Вилюй.

Увеличение диапазона частот с 6-125гц до диапазона 6-500гц приводит к некоторому снижению контрастности глубинного разреза и частичному затухиванию горизонтального тела ксенолита.

Результаты работ

На рис.4 приведена интерпретационная модель результатов работ в виде комплекта

инженерно-геологической фотографии (4А) фрагмента правобережного примыкания, на которой черным выделены выходы искомого ксенолита; они же показаны белыми овалами на космоснимке (4Б, вверху) участка работ; временного разреза микросейсм (4Б, слева внизу) на котором белым выделена псевдоглубинная структура; и глубинно-миграционный разрез (4Б, справа внизу).

Псевдоглубинная структура на временном разрезе микросейсм соответствует распределению участков поглощения энергии источника микросейсм и отражает зависимость зарегистрированного поглощения от геологического строения участка работ и его частотных свойств. За отсутствием других объяснений, данная структура связывается с наличием ксенолита траппового поля правобережного примыкания Вилюйской ГЭС-1\2 выполненного дисперсными породами.

Глубинный миграционный разрез по сейсмическому профилю слабо зависит от использованного частотного диапазона, что объясняется спецификой исходного поля, которое имеет выраженную несущую частоту (25Гц) и ее кратности. Выявлена глубинно-миграционная структура ксенолита как состоящего из вертикального и горизонтального тела полого падения. Вертикальное тело имеет питающие рукава со стороны водохранилища (выделено горизонтальными стрелками на 4Б, справа внизу) и выходы на дневную поверхность (см. космоснимок участка работ). Горизонтальное тело пересекает участок контрольной скважины 78, что дает возможность его заверки.

Заверка проведена путем прямого наложения температурного разреза, построенного по профилю термометрических скважин 75-78 [12] и расположенного перпендикулярно сейсмическому профилю (на рисунке 4Б справа внизу частично смещено для наглядности). В полном цвете данный температурный разрез приведен на рис.1в. Из прямого построения видно, что интервал максимальных температур разреза непосредственно совпадает с интервалом минимальных амплитуд горизонтального тела ксенолита. Другими словами, согласно прямым геотемпературным измерениям, растопленный канал ксенолита приурочен к участку минимальных амплитуд одного из тел ксенолита мигрированного разреза на интервале абс. отметок примерно 335м-345м с кровлей на глубине около 10м, что и подтверждается данными в конце раздела «Инженерно-геологическая ситуация». Вне горизонталь-

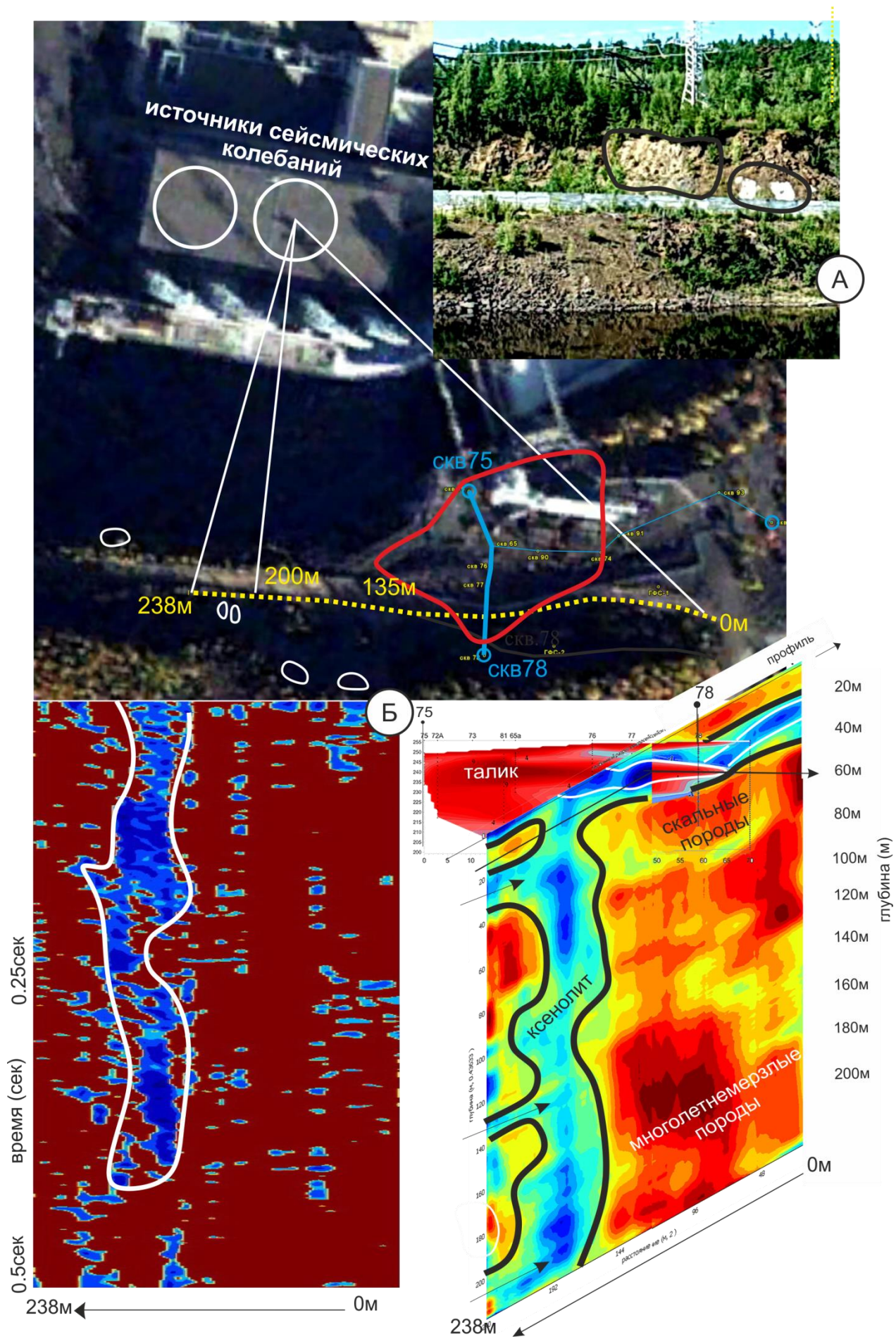


Рис.4. А) инженерно-геологическая фотография. Б) Комплект из трех рисунков: участок работ (вверху), временной разрез (слева), глубинный мигрированный разрез (справа).

ного тела ксенолита аномальных температур не наблюдается.

С учетом того, что: а) данные по временному разрезу поглощения (дисперсное тело ксенолита обладает повышенными поглощающими свойствами) в целом совпадают с данными по глубинному миграционному разрезу, б) представленные временной и глубинный миграционный разрезы получены независимыми путями; можно сделать вывод, что на пути решения основной инженерно-геологической задачи достигнуты положительные результаты. Тем не менее, для окончательного подтверждения результата необходимы работы по заверочному бурению.

Выводы

Предложена методика оценки инженерно-геологического строения участка исследования с использованием гидротурбинных агрегатов электростанции в качестве источника волнового поля (техногенных микросейсм). В предложенной модификации не требуется использования импульсных источников и, соответственно, не требуется знания скоростей упругих волн и другой информации ими поставляемой. Более того, исходное волновое поле дается «даром» и от потребителя методики требуется просто расставить косу сейсмоприемников на участке работ. По наблюдаемым микросейсмам строятся временной разрез поглощения энергии микросейсм в среде и глубинный миграционный разрез для двумерно-неоднородной скоростной модели. По результатам их совместной интерпретации, возможно получение реалистической оценки глубинного строения среды по отработанному профилю, в т.ч. для дальнейшей (параллельной) полномасштабной обработки данных импульсных источников.

При всей относительной простоте структуры поля микросейсм по сравнению с громоздкими построениями по данным от импульсных источников, возможно получение достаточно информативных результатов, которые согласуются с геологическими материалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронков О.К., Инженерная сейсмика в криолитозоне., Ст-Птб, 2009г
2. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М., Сейсмические методы в инженерной геологии, М., Недра, 1973.
3. Жерняк Г.Ф., Неклюдов В.В., Быстрая миграция сейсмических полей с накоплением, Геология и Геофизика, №9, 1991.

4. Иванова Ю.В. Изучение микросейсмических шумов в теле плотины Камской ГЭС, Третья Уральская молодежная школа по геофизике. Сборник докладов. -Екатеринбург: УрО РАН, 2002. -С.42-44.

5. Иванова Ю.В. О влиянии Камской ГЭС на уровень микросейсмических шумов, Геология и геоэкология, исследования молодых. Материалы XIII молодежной конференции. "Минералогия, кристаллография, полезные ископаемые и геофизика, петрофизика" Т2. - Апатиты: ООО "Апатит-Медиа", 2002. -С.139-140.

6. Калинина А.В., Аммосов С.М., Волков В.А., Сейсмический шум: опыт применения в инженерно-геофизических исследованиях, Разведка и Охрана недр, 1, 2008.

7. Кривоногова Н.Ф., Зискович В.Е., Каган А.Л., Роль мерзлотных условий в практике проектирования гидротехнических сооружений, сб. Инженерное мерзлотоведение, Материалы к III Международной конференции по мерзлотоведению, 1979

8. Неклюдов В.В., Шарнин А.Н., Алгоритм продолжения полного волнового поля в неоднородную среду, сб. Обратные задачи геофизики, под ред. ак. Алексеева А.С., ВЦ СО РАН СССР, 1989г.

9. Неклюдов В.В., Жерняк Г.Ф., Программные комплексы миграции сейсмических волновых полей, XXXIV International Geophysical Symposium, Kiev, Ukraina, 1991.

10. Оловин Б.Я., Фильтрационная проницаемость вечномерзлых грунтов, Наука, 1993г.

11. Отчет о научно-исследовательской работе "Исследования особенностей формирования температурно-фильтрационного режима правобережного примыкания водосброса и разработка рекомендаций по обеспечению его эксплуатационной надежности", ОАО СибНИИГ, 2004

12. Отчет "Геофизический мониторинг состояния правобережного примыкания ВГЭС-1\2 им. Е.Н. Батенчука", ВНИМС ИМЗ СО РАН, 2012г

13. Kjartansson E., Constant Q-wave propagation and attenuation: J. Geophys. Res., 1979, 84,4737-4748.

14. Time Frequency Signal Analysis and Proceeding. A comprehensive Reference. Edited by Boualem Boashash, 2003, Elsevier.