11. *Filatova V.* Tectonophysical conditions of magma feeding channels formation in the Archaean basement of the north-eastern Baltic Shield / Proceedings of the 34th International Geological Congress, 5–10 August 2012. — Brisbane, Australia, 2012. — P. 2254.
12. *Mitrofanov F.P., Pozhilenko V.I., Smolkin V.F. et al.* Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield). — Apatity: KSC RAS, 1995.

© Филатова В.Т., Петров В.П., 2015

Филатова Валентина Тимофеевна // filatova@geoksc.apatity.ru
Петров Валентин Петрович // petrov@admksc.apatity.ru

УДК 550.834.05

Романов В.В. (МГРИ-РГГРУ)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ НА ПРИМЕРЕ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА

Рассматриваются основные приемы интерпретации данных малоглубинной сейсмической томографии на примере изучения оползневых склонов. На конкретном примере анализируются непрерывные распределения скорости продольных и поперечных волн, параметра добротности и анизотропии сейсмических свойств. По полученным данным выделяются признаки составляющих оползневого склона — геологических границ, плоскостей скольжения, блоков смещенных или деформированных пород и уровня грунтовых вод. ***Ключевые слова:*** *инженерная сейсморазведка, интерпретация, метод преломленных волн, сейсмотомография, оползни.*

Romanov V.V. (MGRI-RGGRU)

INTERPRETATION OF SEISMIC TOMOGRAPHY FOR EXAMPLE STUDY THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE LANDSLIDE SLOPE

The article discusses the basic techniques of data interpretation of near-surface seismic tomography in the study of landslide-prone slopes. In a specific example, analyzes a continuous distribution of velocities of primary and shear waves, Q-factor and anisotropy of seismic properties. The data obtained are features of the components of the landslide slope and geological boundaries, slip planes, blocks displaced or deformed rocks and groundwater levels. ***Key words:*** *near-surface seismic, interpretation, method of the refracted waves, seismic tomography, landslides.*

Введение

Развитие оползней предопределяется геологическим строением древней Восточно-Европейской платформы. Из-за увлажнения перегруженные блоки грунтов верхней части геологического разреза смещаются вниз по склону без отрыва от неподвижного основания, образуя оползни. Долины современных и палеорек проходят в толще каменноугольных известняков, юрских глин и четвертичных отложений преимущественно ледникового происхождения. В пластичных юрских глинах с наклонной кровлей по ослабленным зонам развиваются инсеквентные оползни скольжения. Четвертичные отложения обычно характеризуются хорошей проницаемостью, и воды атмосферных осадков быстро достигают глинистых толщ, что вызывает избыточное увлажнение последних. Блоки четвертичных грунтов в период обильных осадков отрываются от основной массы и соскальзывают по ослабленным поверхностям (зеркалам) вниз по склону. На поверхности при этом формируются циркообразные стенки отрыва с практически вертикальным профилем (рис. 1)

Рис. 1. Стенка отрыва активного оползня

Мониторинг и прогнозирование оползневых процессов базируются на всестороннем анализе геологического строения склона, в чем немалую роль играют геофизические методы. Инсеквентные оползни наиболее сложны для геофизического изучения, т.к. дифференциация глинистых пород по физическим свойствам в пределах оползня и в ненарушенном массиве выражена недостаточно четко.

Одним из важнейших разделов инженерной геофизики является сейсморазведка, основанная на использовании искусственно возбуждаемых упругих волн. В малоглубинной инженерной сейсморазведке применяются слабые механические ударные источники с накоплением воздействий и расстановки приемников небольшой длины — от 50 до 100 м. Для более надежной интерпретации на одних и тех же профилях реализуются сейсмические методы продольных и поперечных волн. Для построения сейсмогеологических разрезов применяются обработанные сейсмограммы или выделенные на них годографы упругих волн. Сейсмические границы не всегда связаны с изменением литологии. Они могут проходить по уровню грунтовых вод, оконтуривать области разуплотнения или напряженного состояния блоков горных пород. Проведенная сейсморазведка при правильной геологической интерпретации помогает получить детальную картину формирования оползней на склонах и предсказать их дальнейшее развитие.

Предпосылки использования сейсмических методов

В настоящий момент установлено, что поверхности скольжения оползней выделяются по характерным изменениям сейсмических параметров горных пород. Деформация тела оползня при смещениях значительно изменяет его физические свойства по сравнению с ненарушенным массивом. Оползневое тело отличается анизотропией упругих параметров, что связано с трещиноватостью и является характерной особенностью оползневых массивов [1].

Сейсморазведка способна обнаружить и проследить те границы, которые отделяют слои горных пород (грунтов), отличающиеся значениями упругих модулей. На таких границах образуются преломленные и отраженные волны, регистрируемые на сейсмограммах. Возможность решения геологических задач сейсморазведкой на конкретном объекте определяется диффе-

ренциацией слоев горных пород по скорости продольных и поперечных волн. Значение скорости продольных волн V_P в первую очередь зависит от характера водонасыщения грунтов. Во влажных, но не полностью водонасыщенных отложениях песчано-глинистого состава V_P не выходит за пределы диапазона 200–700 м/с, в полностью водонасыщенных породах параметр V_P резко возрастает до уровня 1500–1700 м/с (таблица) [2].

С полным водонасыщением связана важная гидрогеологическая граница — уровень грунтовых вод (УГВ), отчетливо выделяемая при помощи продольных преломленных волн. Циркуляция подземных вод оказывает решающее влияние на формирование оползней скольжения, поэтому детальное прослеживание УГВ на разрезах и в плане обязательно входит в программу исследований оползневых склонов. Мониторинг положения УГВ применяется для определения степени увлажненности оползневых тел.

При пересечении ослабленной зоны амплитуда волны уменьшается из-за неупругого поглощения. Изучение поля распределения добротности Q_P (величины, обратной декременту поглощения) продольных волн в разрезе позволяет выделять даже слаборазличимые по скоростным признакам ослабленные зоны, которые впоследствии могут стать зеркалами скольжения оползней [3].

Из-за слабого влияния водонасыщенности на скорость поперечных волн по ней более точно выделяются границы слоев различного литологического состава. Отложения четвертичного возраста, независимо от насыщенности водой, характеризуются скоростью поперечных волн V_S в относительно узком интервале 150–250 м/с [4, 5]. В более древних отложениях глинистого состава V_S поднимается до 300–500 м/с. В элювии карбонатных пород V_S увеличивается до 500–800 м/с, в плотных известняках и доломитах V_S превышает 1000 м/с. Свободная поверхность грунтовых вод, экранирующая продольные волны, для поперечных волн акустически прозрачна, поэтому нижележащие геолого-геофизические границы выделяются значительно четче (таблица). Скорость поперечных волн различается также в относительно плотных горных породах и в отложениях коры выветривания.

Данные, полученные при помощи поперечных волн, удовлетворительно коррелируются с литолого-стратиграфическими границами, установленными разведочным бурением (рис. 2).

Типичные значения сейсмических и плотностных свойств пород верхней части разреза Восточно-Европейской платформы

Возраст	V_S, м/с	V_P, м/с	ρ, г/см^3
Q_{II}	200	500	1,40
J_3	300	1700	1,70
eC_3	500	2000	2,20
C_3	1000	2300	2,60

Примечание: V_P — скорость продольных волн, V_S — скорость поперечных волн, ρ — плотность

В последнее время в сейсморазведке большое внимание уделяется анизотропии упругих свойств. По плоскости напластования скорости волн в слоистых средах обычно больше, чем в перпендикулярном направлении. Степень анизотропии выражается при помощи коэффициента K(1).

$$K = \frac{V_{\parallel}}{V_{\perp}}, \qquad (1)$$

где $V_{\parallel}$ — значение скорости вдоль напластования; $V\perp$ — поперек напластования.

Анизотропия скорости присуща всем осадочным горным породам, особенно глинам и аргиллитам. Блоки горных пород, в стадии предшествующей оползанию, находятся в напряженном состоянии. В направлении вектора напряженности скорость поперечных волн имеет аномально высокое значение, что приводит к увеличению коэффициента анизотропии даже изначально изотропных пород на 10–20 %. После смещения тело оползня вращается, деформируется и сминается, в результате чего слоистость грунтов нарушается, и коэффициент анизотропии снижается до уровня 0,8–0,9.

Совместное наблюдение продольных и поперечных волн на одном объекте применяется для расчета основных физико-механических свойств оползневых тел — удельного сцепления C и угла внутреннего трения ϕ. Корреляционные зависимости между сейсмическими и физико-механическими свойствами позволяют проводить расчет устойчивости оползневого склона.

Сейсмическая томография

Стандартные технологии обработки данных методов отраженных и преломленных волн в инженерной сейсморазведке обычно не учитывают слоистое строение покрывающей толщи над опорными границами. Вместе

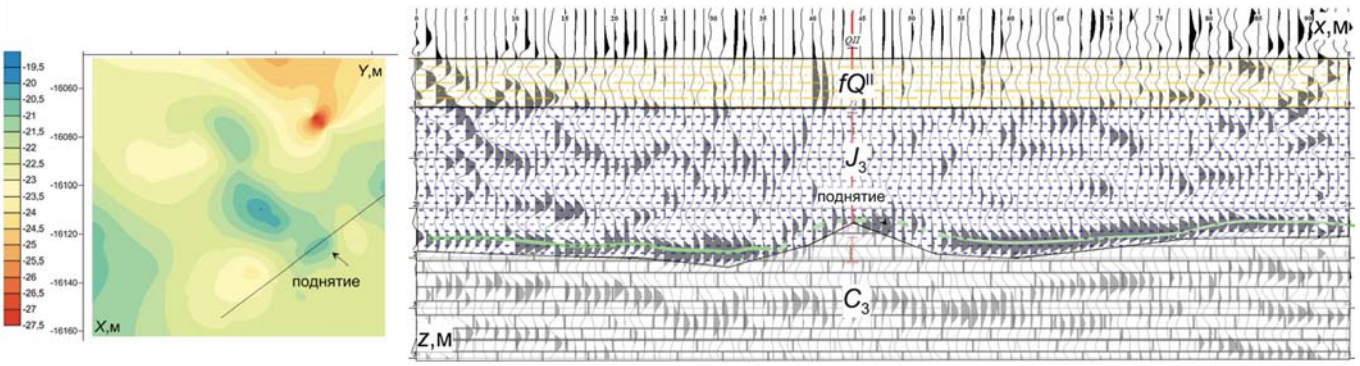

Рис.2. Прослеживание кровли верхнекаменноугольных известняков по отраженным поперечным волнам. Справа изображен проинтерпретированный глубинный разрез, слева — структурная карта отражающего горизонта

с тем, упругие свойства геологической среды значительно изменяются в вертикальном и горизонтальном направлении. В общем случае значение скорости упругих волн является непрерывной функцией двух координат $V(x,z) = f(x,z)$. Годографы первых вступлений в таких средах имеют сложную криволинейную форму, зависящую от положения пункта возбуждения в пределах расстановки. Если каждый элемент разреза будет пересечен лучами сейсмических волн достаточное количество раз, то по временам вступления на профиле можно восстановить значения функции $V(x,z)$.

Надежность решения задачи томографического исследования геологического строения зависит от сложности геолого-геофизического строения среды и детальности самой сейсмической съемки. В томографическом варианте пункт возбуждения перемещается по фиксированной расстановке приемников с небольшим шагом возбуждения в 2–10 м. На зафиксированных сейсмограммах коррелируются годографы первых вступлений, по которым в автоматическом режиме подбирается наиболее подходящая модель, состоящая из множества сейсмически однородных ячеек — блоков. Значение скорости в блоках кодируется цветом, изображение сглаживается для облегчения последующего анализа (рис. 3).

Помимо нахождения значений скорости (инверсия по времени) сейсмическая томография может базироваться на изучении амплитуд волн в первых вступлениях. Так же, как скорость волн локальных элементов упругой среды влияет на время, так и декремент поглощения изменяет значение амплитуды. Многократное «сканирование» среды применяется для восстановления по измеренным амплитудам на поверхностном профиле распределения декремента υ или обратной ему величины добротности Q в плоскости разреза. По отношению скоростей волн по горизонтальной и вертикальной оси находится коэффициент анизотропии K.

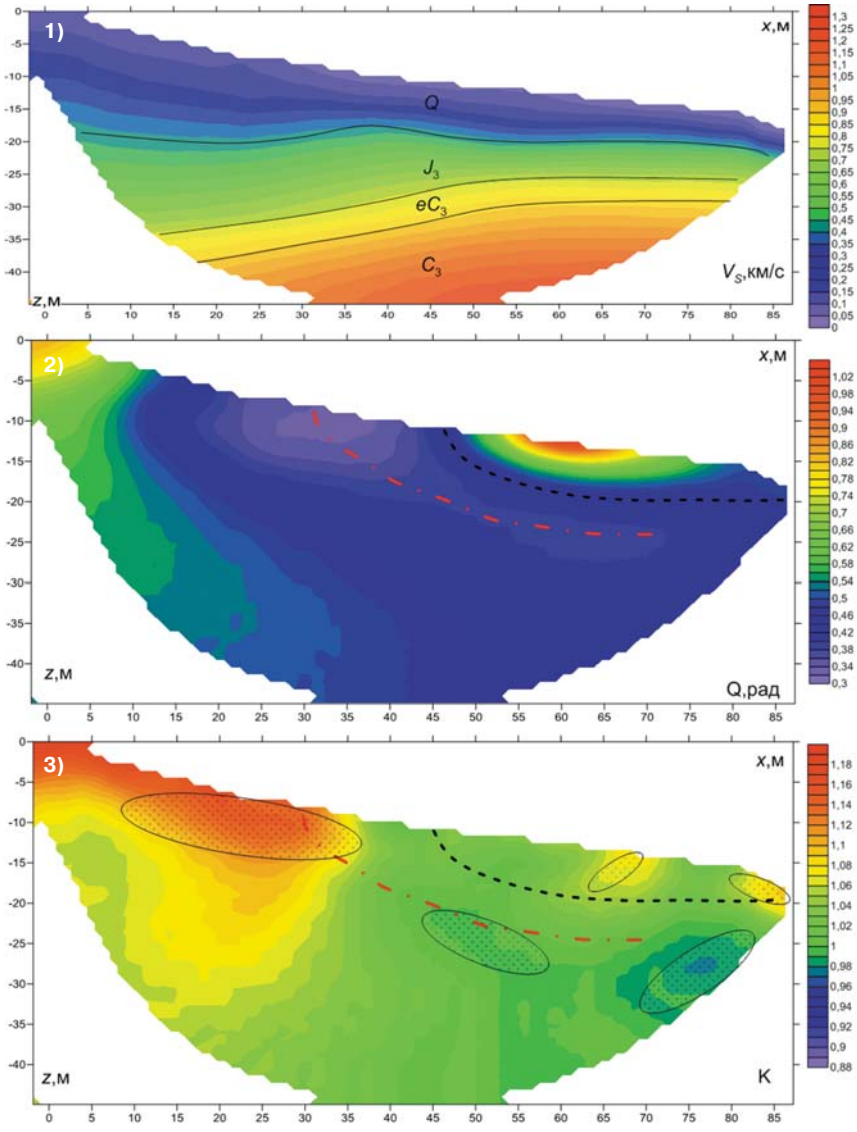

Рис. 3. Изучение оползневого склона сейсмической томографией. Сверху-вниз: 1) распределение скорости поперечной волны; 2) распределение добротности, найденное по амплитудам продольных волн; 3) коэффициент анизотропии. Черной пунктирной линией отмечено существующее зеркало скольжения (фиолетовый цвет), красным штрих-пунктиром — образующееся зеркало, овальные области — зоны растяжения (красный цвет) и зоны смятия (синий). Все изображения получены в программе *ZondST2D*

На изображениях распределения скорости поперечных волн выделяются важнейшие геолого-геофизические границы и находятся физико-механические свойства пород. Для изучения оползней особый интерес вызывает картирование глинистых толщ и элювиальных отложений, в которых возможно образование поверхностей скольжения. Несмотря на то что в ослабленных зонах значение скорости упругих волн обычно уменьшается, определить контур ослабленных зон на скоростных томографических разрезах обычно не удается. Зеркала скольжения надежно диагностируются на разрезах добротности по контуру зоны пониженных значений, где локально возрастает декремент поглощения. На разрезах коэффициента анизотропии отмечаются отдельные зоны растяжения, в которых грунты стремятся сместиться вдоль поверхности скольжения и зоны сжатия, деформированные смещенными оползневыми массами. Зоны обоих типов приурочены к зеркалам скольжения, что увеличивает надежность их выделения.

Проведение сейсморазведки по относительно регулярной сети профилей и ее томографическая обработка применяются для построения структурных карт и объемных моделей геологических границ оползневых склонов с нанесенными на них значениями упругих параметров. Распределение упругих свойств грунтов в пространстве дает намного более полную информацию о структуре оползневых тел и возможном направлении оползневых процессов. На рис. 4 представлена объемная модель кровли юрских глин, в центральной части которой отмечается узкий желоб, вдоль которого преимуществен-

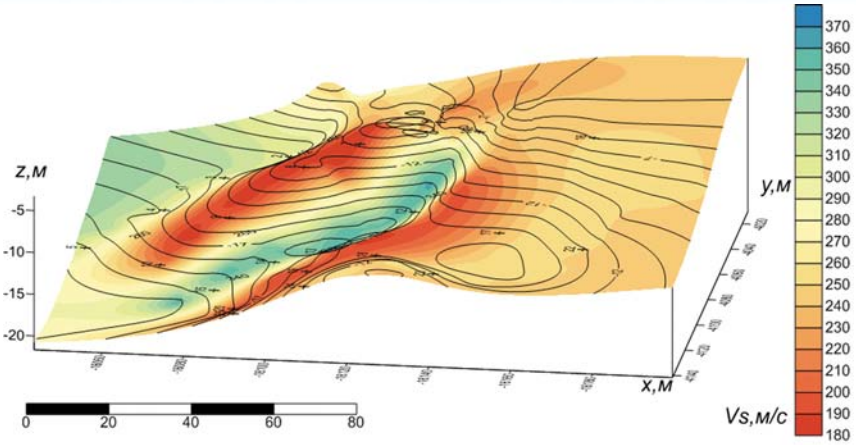

Рис. 4. Объемная модель распределения скорости поперечных волн в кровле юрских глин. В центральной части склона выделяется прогиб, вдоль которого преимущественно развиваются оползневые процессы

но смещаются блоки вышележащих горных пород. В основании желоба скорости поперечных волн имеют повышенные значения, что указывает на их сжатое состояние. В краевых зонах скорость волн понижена, т.к. под воздействием сдвиговых напряжений рыхлые четвертичные грунты разуплотняются.

Заключение

В инженерной сейсморазведке сейсмическая томография применяется сравнительно недавно, однако данный метод отличается большим количеством удобной для интерпретации информации. Такие объекты, как оползневые склоны, отличаются сложностью геологического строения и слабой дифференциацией физико-механических свойств. Разведочное бурение и лабораторные исследования не всегда способны дать полную картину актуального состояния оползневого склона. По разрезам сейсмической томографии при помощи рассмотренных в статье признаков достаточно надежно выделяются контуры поверхностей скольжения, блоков грунтов в напряженном или деформированном состоянии и многие другие элементы оползней. Использование в интерпретации данных о поглощении и анизотропии значительно расширяет возможности сейсмотомографического метода исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Куликов А.И.* Проблематика применения томографических технологий инженерной геофизики для изучения оползнеопасных склонов // Engineering Geophysics 2013-Conference and Exhibition. — 2013.
2. *Горяинов Н.Н.* Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. — М.: Недра, 1992.
3. *Молдаков В.В., Коновалова Е.Ю.* Опыт применения комплекса геофизических методов на оползневых склонах города Сочи // Engineering Geophysics, 2012.
4. *Романов В.В.* Изучение толщи четвертичных отложений Подмосковья инженерной сейсморазведкой // Геофизика. — 2014. — № 3. — С. 41–48.
5. *Романов В.В., Рахматуллин И.И.* Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений Дмитровского района Подмосковья // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2014. — № 3. — С. 86–88.

© Романов В.В., 2015

Романов Виктор Валерьевич // roman_off@mail.ru

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 549:622/533.31

Иванова М.В., Астахова Ю.М., Сорокин Е.М., Броницкая Е.С., Ожогина Е.Г. (ФГУП «ВИМС»)

ОСОБЕННОСТИ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛОВ ЖЕЛЕЗА В РУДАХ СЕРОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Показаны особенности раскрытия минералов железа в продуктах обогащения комплексных охристых железных руд Серовского месторождения. Установлено, что методами глубокого обогащения достигнуть приемлемого раскрытия не предоставляется возможным. ***Ключевые слова:*** *железные руды, охристые руды, раскрытие минералов, магнетит, гематит, каолинит.*

Ivanova M.V., Astakhova J.M., Sorokin E.M., Bronitskaya E.S., Ozhogina E.G. (VIMS)

FEATURES OF IRON MINERALS DISCLOSING IN THE SEROV ORE FIELD

The features of the disclosure of iron minerals in products enrichment complex ocher iron ore in the Serov field. It is established that to achieve an acceptable disclosure of ore minerals is not possible by methods of deep concentration. ***Key words:*** *iron ore, ocher ore, disclosure of minerals, magnetite, hematite, kaolinite.*

В настоящее время в связи с вовлечением в промышленную переработку месторождений железных руд, ранее считавшихся труднообогатимыми и неперспективными, проводится их геолого-экономическая переоценка. Такая оценка позволяет получать полные данные о составе и технологических свойствах руды и прогнозировать технологию ее переработки и качество ожидаемых продуктов.

Серовское месторождение комплексных железных руд расположено в 15 км к северо-западу от г. Серова и приурочено к Заморайской мезо-кайнозойской депрессии, ограниченной с востока серпентинитовым массивом. Месторождение может рассматриваться как крупнейшее на Северном и Среднем Урале. По разным оценкам в зависимости от бортового содержания руды запасы достигают 1 007 357 тыс. т [1].

На Серовском месторождении бурых железняков с повышенным содержанием хрома согласно работам