ЕРМАКОВ А.П.

Ведущий научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, ermakov@geol.msu.ru

ВЛАДОВ М.Л.

Заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д. ф.-м. н., профессор, г. Москва, vladov@geol.msu.ru

ШМУРАК Д.В.

Магистрант Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, shmouraque@gmail.com

ERMAKOV A.P.

Leading researcher of the Seismometry and Geoacoustics Department of the Geology Faculty of the Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow,

ermakov@geol.msu.ru VLADOV M.L.

Head of the Seismometry and Geoacoustics Department of the Geology Faculty of the Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Physics and Mathematics), professor, Moscow, vladov@geol.msu.ru

SHMURAK D.V.

Graduate student of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, shmouraque@gmail.com

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОВОЛНОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРИ ОЦЕНКЕ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ

AN EXPERIENCE OF USING MULTIWAVE SEISMIC SURVEY FOR KARST HAZARD ASSESSMENT

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка; метод первых вступлений; карст; деформационно-прочностные характеристики грунтов; линейные сооружения.

Аннотация: в работе представлены результаты сейсмических исследований методом первых вступлений на переходе через реку Ухта (Республика Коми, Россия). С использованием многоволнового подхода получены скоростные глубинные разрезы в изолиниях скоростей распространения продольных и поперечных волн. На основании распределения скоростей рассчитаны разрезы упругих и деформационно-прочностных характеристик грунтового массива (отношения скоростей поперечных и продольных волн, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, модуля деформации, предела прочности на одноосное сжатие).

Введение

При проведении инженерно-геологических изысканий для строительства различных линейных сооружений (дорог, трубопроводов и др.) на территориях с развитием карста возникает необходимость в подробном описании геометрии и прочностных свойств кровли карстующихся пород (в том числе коры выветривания), нередко перекрытых рыхлыми отложениями.

Проявления карстовых процессов в рельефе дневной поверхности хорошо

известны и изучены. Особое внимание при строительстве линейных сооружений должно уделяться выявлению не выраженных в рельефе карстовых полостей, которые наиболее часто встречаются на склонах берегов рек, где широко развиты оползневые процессы.

В инженерной геологии для определения деформационно-прочностных характеристик грунтов проводятся их полевые испытания в условиях естественного залегания. На стадии предварительного проектирования применяются

Key words: shallow seismics; first-arrival method; karst; deformation-strength soil characteristics; line structures.

Abstract: the article presents results of seismic exploration by the first-arrival method at the Ukhta river crossing (the Komi Republic, Russia). Deep cross-sections of P- and Swave isolines were obtained using the multiwave approach. Cross-sections of elastic and deformation-strength characteristics of the explored soil body (the ratio of S- and P- wave velocities, Young's modulus, Poisson's ratio, deformation modulus, ultimate uniaxial compression strength) were calculated on the basis of the velocities distribution.

> различные варианты статического и динамического зондирования в шурфах или скважинах [7]. Результатами полевых экспериментов могут быть такие деформационно-прочностные характеристики грунтов, как модуль деформации и предел прочности на одноосное сжатие с последующим выделением инженерно-геологических элементов.

> Альтернативным инструментом для определения деформационных и прочностных свойств грунтов, не нарушающим сплошности грунтового массива,

является малоглубинная сейсморазведка. Этот геофизический метод способен давать изображения геологической среды — геометрию и форму границ, распределение прочностных и деформационных характеристик. Возможность его применения для картирования кровли скальных пород, перекрытых рыхлыми отложениями, и поиска карстовых полостей обусловлена контрастом акустических свойств рыхлых, скальных и разрушенных скальных пород. Опыт использования сейсморазведки для расчета прочностных характеристик грунтов достаточно хорошо освещен во многих работах [1, 5, 6 и др.].

При данном исследовании возможности сейсморазведки карстующихся пород были рассмотрены на примере профиля вдоль трассы проектируемого газопровода на переходе через реку Ухта (Республика Коми), где широко развиты оползневые процессы и распространен скрытый карст (рис. 1).

Профиль сейсмических наблюдений был ориентирован с северо-востока на юго-запад и имел длину 656 м без учета ширины Ухты. Он располагался ортогонально руслу реки вдоль крутого склона (при правильном учете перепада высот крутизна склона не приводит к возник-



Рис. 1. Расположение профиля сейсмических наблюдений на переходе через реку Ухта (Республика Коми). Пикеты профиля показаны прямоугольниками (розовыми — на правом берегу, серыми — на левом)

новению погрешностей в определении глубин преломляющего горизонта). Для учета рельефа вдоль профиля была проведена также геодезическая съемка.

Сейсморазведочная аппаратура и методика полевой съемки

Для решения задач, связанных с поиском и картированием кровли карстующихся пород и карстовых полостей, могут быть использованы стандартный комплект сейсморазведочного оборудования и полевая методика, предполагающая регистрацию первых вступлений продольных и поперечных волн.

Полевые измерения осуществлялись с использованием двух специализированных линейных сейсмических станций «Лакколит 24-М2» с 48 активными каналами (ООО «ЛогиС», г. Раменское) и сейсмических приемников марки GS-20 DX с вертикальной и горизонтальной осями максимальной чувствительности (ООО «Геоспейс Технолод-

Таблица 1

Описание геологических колонок скважин № 201 и 224, расположенных в пределах изучаемого профиля сейсмических наблюдений

№ скваж.	№ слоя	Мощность, м	Глубина залегания кровли, м	Описание
201	1	0,1	0,1	Почвенно-растительный супесчаный слой коричневого цвета с корнями деревьев, травой
	2	2,4	2,5	Песчанистая супесь коричневого цвета с единичными прослоями мелкого песка средней плотности и средней степени водонасыщения мощностью до 0,3 м
	3	1	3,5	Полутвердый легкий песчанистый суглинок коричневого цвета (с глубины 3,5 м — серого) с включением щебня алевролитов (до 15–25%) с размером частиц 2–3 см
	4	2,1	5,6	Твердая легкая песчанистая глина голубовато-серого цвета с включением дресвы алевролитов (до 5–7%) с размером частиц 0,5–1,0 см и единичными частицами крупного щебня слабовыветрелых прочных плотных алевролитов зеленовато-серого цвета диаметром до 10–15 см
	5	1,5	7,1	Выветрелый трещиноватый прочный плотный известняк (известковый песчаник?) зеленовато-серого цвета с редкими субгоризонтальными прослоями зеленовато-серого тонкозернистого алевролита мощностью до 1–2 см и редкими мелкими кавернами и полостями
		0,8	7,9	Провал снаряда (карстовая полость)
		2,1	10	Выветрелый трещиноватый прочный плотный известняк (известковый песчаник?) зеленовато-серого цвета с редкими субгоризонтальными прослоями зеленовато-серого тонкозернистого алевролита мощностью до 1–2 см и редкими мелкими кавернами и полостями
224	1	0,1	0,1	Почвенно-растительный слой с травой и корнями деревьев
	2	1,1	1,2	Пластичная песчанистая супесь коричнево-серого цвета с редкими прослоями коричневого мелкого песка мощностью до 1–2 см
	3	8	9,2	Полутвердый легкий песчанистый суглинок серого и коричнево-серого цвета с включением гравия (до 10–15%) с размером частиц 1–2 см и единичных частиц гальки размером до 7–10 см
	4	0,8	10	Плотный пылеватый песок серого и темно-серого цвета средней степени водонасыщения
	5	0,5	10,5	Полутвердый легкий песчанистый суглинок темно-серого цвета с включением гравия (до 10–15%) с размером частиц 1,0–1,5 см
	6	4	14,5	Твердая легкая пылеватая глина голубовато-серого цвета
	7	0,5	15	Очень плотный прочный тонкослоистый скрытокристаллический известняк серого цвета

жис Евразия», г. Уфа). Привязка на местности осуществлялась с использованием системы глобального позиционирования GPS (США).

Исследования проводились методом первых вступлений, т.е. регистрировались первые вступления продольных и поперечных сейсмических волн. Шаг между пунктами приема (ПП) составлял 2 м, длина приемной линии — 94 м. В пределах этого промежутка имелось 7 пунктов возбуждения (ПВ) с шагом 16 м. Для увеличения длины годографов первых вступлений использовались 2 выносных пункта возбуждения, располагавшихся слева и справа от приемной линии. Максимальная длина годографов преломленных волн с учетом выносных пунктов возбуждения составила 142 м, что для исследуемого района обеспечивает глубинность порядка 30-35 м.

Геологическая характеристика верхней части разреза по данным бурения инженерно-геологических скважин

На левом, северо-восточном, берегу реки выделяются две области с различным геологическим строением — надпойменная терраса и ее склон, примыкающий к реке.

Надпойменная терраса по данным бурения инженерно-геологической скважины № 224 представлена (сверху вниз) интегральной толщей супеси, суглинка и песка мощностью 10,5 м, сменяющейся слоем глин мощностью 4 м. Скважина № 224 на глубине 14,5 м вскрыла кровлю прочного очень плотного известняка.

Склон террасы по данным бурения инженерно-геологической скважины № 201 представлен (сверху вниз) интегральной толщей супеси и суглинков мощностью 3,5 м, слоем твердых глин мощностью 2,1 м и трещиноватым известняком с мелкими кавернами и полостями. В интервале глубины 7,1-7,9 м произошел провал бурового снаряда, что свидетельствует о наличии здесь карстовой полости. На глубине 7,9 м снова был вскрыт известняк, аналогичный ранее описанному. Более подробное описание геологических колонок скважин № 201 и 224 представлено в табл. 1, составленной по данным ООО «ИГИИС» (г. Москва).

Обработка полевых материалов и построение сейсмических разрезов

На стадии полевых работ осуществлялся контроль качества исходных материалов — сейсмограмм об-



Рис. 2. Последовательность обработки сейсмических материалов



Рис. 3. Примеры систем годографов первых вступлений преломленных продольных (а) и поперечных (б) волн, увязанных по взаимному времени, для участка профиля на левом берегу реки Ухта. Красным и синим цветом показана пара взаимно увязанных годографов для пунктов возбуждения (SP — source point), расположенных на расстояниях 48 и 142 м от начала профиля (SP: 48 ID: 048 и SP: 142 ID: 142 соответственно). Синие и красные кружки на них соответствуют взаимно увязанным моментам времени

щего пункта возбуждения (ОПВ), которые далее подвергались первичной обработке.

Первичная обработка включала в себя: отбраковку сейсмограмм низкого качества; удаление трасс с высоким уровнем шума; учет статических сдвигов, связанных с погрешностями в синхронизации момента возбуждения сейсмического сигнала и начала записи сейсмической станции; присвоение геометрии полевым данным; суммирование сейсмических сигналов для каждого ПВ. Дальнейшая обработка полевых материалов направлена на получение сейсмических разрезов в изолиниях скоростей распространения поперечных (V_s , м/с) и продольных (V_p , м/с) волн и последующий расчет разрезов упругих и деформационно-прочностных характеристик грунтового массива: V_s/V_p , модуля Юнга, коэффициента Пуассона, модуля деформации, предела прочности на одноосное сжатие и др.

Последовательность обработки сейсмических материалов показана на рис. 2.

Сейсмические разрезы в изолиниях скоростей распространения продольных и поперечных волн

После предварительной обработки полевых сейсмограмм общего пункта возбуждения были оцифрованы времена первых вступлений преломленных волн и сформированы системы их годографов, увязанных по взаимному времени. Точность увязки годографов была не хуже 1 и 2 мс для продольных и поперечных волн соответственно. Примеры систем годографов первых вступлений продольных и поперечных преломленных волн приведены на рис. 3.

Построение сейсмических разрезов осуществлялось в программном пакете «Годограф» (разработанном на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), в основе алгоритма работы которого лежит метод однородных функций (МОФ), предложенный В.Б. Пийп [4]. Эти работы проводились в предположении двумерной неоднородности среды, содержащей локальные волноводы (слои с пониженной скоростью). В связи с этим для обработки и интерпретации систем годографов первых вступлений применялся метод однородных функций, допускающий произвольный скоростной закон как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Сейсмические разрезы по рассматриваемому профилю в изолиниях скоростей распространения продольных и поперечных волн представлены на рис. 4.

Сейсмическая интерпретация разрезов в изолиниях скоростей распространения волн происходит путем отождествления сейсмических границ 1-го и 2-го рода с геологическими границами с привлечением в первую очередь данных бурения инженерно-геологических скважин, а также геофизической информации, полученной с помощью других методов [2]. В частности, выделенные на разрезах границы с затенением (см. рис. 4) соответствуют кровле зон с пониженными градиентами скоростей. Глубинность разрезов, полученных с помощью МОФ, определяется длиной годографов первых вступлений преломленных волн и, соответственно, глубиной проникновения сейсмических лучей. Самые глубинные части разреза, таким образом, соответствуют наибольшим расстояниям между источником и приемником сейсмических сигналов.

На разрезе в изолиниях скорости распространения продольных волн по



Рис. 4. Сейсмические разрезы в изолиниях скоростей продольных (V_p) (а) и поперечных (V_s) (б) волн по профилю, пересекающему реку Ухта. Шаг изолиний — 200 м/с. Отношение вертикального масштаба к горизонтальному — 1:2

характеру изменений ее градиента выделяются три сейсмических слоя:

- со спокойным и плавным поведением изолиний скорости со значениями порядка 400–1 000 м/с (интегральная толща супеси, суглинка и песка);
- со значениями скорости порядка 1 500–1 800 м/с и ее пониженным градиентом по сравнению с первым сейсмическим слоем (глины);
- 3) с изменением значений скорости от 1 800 м/с (трещиноватые и выветрелые известняки) до 4 000 м/с (крепкие и плотные известняки) в области максимальной глубины сейсмического разреза.

На разрезе в изолиниях скорости распространения поперечных волн ее значения меняются от 200–600 м/с для песков, супесей и суглинков до 1 800–2 000 м/с для крепких и плотных известняков в области максимальной исследованной глубины.

Разрезы, рассчитанные методом однородных функций, были представлены в изолиниях скорости, заданной в узлах прямоугольной сетки. На основании полученного распределения значений скоростей распространения поперечных и продольных волн были рассчитаны разрезы упругих параметров (отношение V_s / V_p , модуль Юнга, коэффициент Пуассона), разрез значений динамического модуля деформации по известным формулам и разрез пределов прочности на одноосное сжатие по корреляционным зависимостям.

Разрезы в изолиниях отношения скоростей поперечных и продольных волн, модуля Юнга и коэффициента Пуассона

Информация о пространственном распределении значений скоростей поперечных и продольных волн позволяет вычислить упругие характеристики среды (отношение V_s / V_p , модуль Юнга E, коэффициент Пуассона σ), а также с помощью корреляционных зависимостей рассчитать распределение значений таких величин, как предел прочности на одноосное сжатие R_c и модуль деформации E_{def} . Поле значений V_s / V_p было рассчи-

Поле значений V_s / V_p было рассчитано с использованием разрезов в изолиниях скоростей распространения поперечных и продольных волн. Разрез в изолиниях V_s / V_p представлен на рис. 5.

Параметр Vs / Vp характеризует «жесткость», или «упругость», среды на сжатие и растяжение. В реальных средах его значения лежат в диапазоне от 0,2–0,3 для рыхлых неконсолидированных осадков до 0,4–0,6 для крепких карбонатных и магматических пород.

Диапазон изменений отношения V_s / V_p , рассчитанного по сейсмическому профилю, составил 0,25–0,55. Его пониженные значения соответствуют рыхлым дисперсным отложениям, ослабленным и трещиноватым зонам; повышенные — крепким консолидированным породам.

Для расчета ряда упругих, а также деформационных и прочностных характеристик среды необходимо знание значений плотности слагающих ее горных пород. Ввиду отсутствия прямой информации о распределении величин плотности проблема была решена следующим образом. Сейсмический разрез был разбит по значениям V_s / V_p на три инженерно-геологических элемента (ИГЭ), соответствующих рыхлым отложениям, ослабленным зонам и прочным породам. Граничные значения V_s / V_p для разбиения были выбраны с учетом данных бурения скважин № 201 и 224.

Несмотря на то что данные бурения скважины 224 показали наличие прочных известняков, при разбиении предпочтение было отдано данным МПВ, поскольку сейсморазведка в этом случае дает интегральную характеристику геологической среды (при длине волны более 10 м). По результатам использования МПВ преобладающая часть толщи известняков оказалась сильно разрушенной (при наличии отдельных останцов, один из которых был вскрыт скважиной № 224).

Полученная модель разреза из трех ИГЭ, использованная для задания поля плотностей, представлена на рис. 6. Для ИГЭ 1, 2 и 3 были установлены значения плотности 1,9; 2,1 и 2,4 г/см³ соответственно.

Разрез значений коэффициента Пуассона σ (безразм.) был рассчитан по известной формуле:

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}.$$
 (1)

Для получения этого разреза необходимо знание только двух непосредственно определяемых характеристик среды — скоростей распространения продольных (V_p , м/с) и поперечных (V_s , м/с) волн.

Физический смысл коэффициента Пуассона — отношение поперечной относительной деформации образца материала к продольной. Для абсолютно хрупкого материала $\sigma = 0$, для абсолютно несжимаемого — $\sigma = 0,5$. Диапазон изменений этого коэффициента, рассчитанного по сейсмическим профилям, составил 0,1–0,4. На рисунке 7 представлен разрез в изолиниях значений σ .

Разрез значений модуля Юнга *E* (МПа) был рассчитан по известной формуле:

$$E = \rho \frac{V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}, \quad (2)$$

где р — плотность грунта, кг/м³.

Модуль Юнга характеризует способность материала сопротивляться одно-



Рис. 5. Сейсмический разрез в изолиниях V_s/V_p . Шаг изолиний — 0,05; отношение вертикального масштаба к горизонтальному — 1:2



Рис. 6. Предварительный инженерно-геологический разрез с выделенными инженерно-геологическими элементами по характеру распределения значений отношения скоростей поперечных и продольных волн (Vs / Vp). Отношение вертикального масштаба к горизонтальному -- 1:2



Рис. 7. Сейсмический разрез в изолиниях значений коэффициента Пуассона σ. Шаг изолиний — 0,05; отношение вертикального масштаба к горизонтальному — 1:2

осному растяжению или сжатию при упругой деформации. Диапазон изменений величин E, рассчитанных по сейсмическим профилям, составил от первых единиц до 500–800 МПа. Разрез в изолиниях вычисленных значений E представлен на рис. 8.

Разрез в изолиниях значений статического модуля деформации

Возможность оценки величин статического модуля деформации E_{def} (МПа) по данным сейсмических наблюдений базируется на наличии связи между двумя группами параметров. Функциональная связь между деформационными и упругими характеристиками была получена в 1970 году И.Г. Минделем, рассматривавшим грунт как упруговязкую пластическую среду [3].

Несмотря на то что для наиболее достоверного определения деформационных характеристик необходимо построение корреляционных зависимостей для результатов совместных испытаний грунтов штампами и сейсмическим методом, в настоящее время накоплено достаточно большое количество информации о связях между такими данными, что позволяет делать оценки с использованием ранее полученных зависимостей для тех или иных типов пород. Для расчета поля значений модуля деформации были выбраны две корреляционные зависимости:



Рис. 8. Сейсмический разрез в изолиниях значений модуля Юнга Е. Шаг изолиний — 1 000 МПа; отношение вертикального масштаба к горизонтальному — 1:2



Рис. 9. Сейсмический разрез в изолиниях значений статического модуля деформации E_{def} . Шаг изолиний — 50 МПа; отношение вертикального масштаба к горизонтальному — 1:2; красная линия — уточненная граница между инженерно-геологическим элементами 1 и 2.

Таблица 2

Классификации значений статического модуля деформации E_{def} для скальных и дисперсных грунтов в соответствии с ГОСТ 25100-2011

Гру	$E_{\mathit{def}},$ МПа				
	практически несжимаемые	<i>E</i> > 20 000			
	слабосжимаемые	$10\ 000 < E \le 20\ 000$			
Скальные	среднесжимаемые	$5\ 000 < E \le 10\ 000$			
	сильносжимаемые	$2\ 000 < E \le 5\ 000$			
	очень сильно сжимаемые	E < 2 000			
	слабодеформируемые	<i>E</i> > 50			
Путотуранови на	среднедеформируемые	$10 < E \le 50$			
дисперсные	сильнодеформируемые	$5 < E \le 10$			
	очень сильно деформируемые	$E \leq 5$			

Таблица 3

Классификация значений предела прочности на одноосное сжатие *R*_с для скальных и полускальных грунтов в соответствии с ГОСТ 25100-2011

Гру	Rc, МПа								
	очень прочные	$R_c \ge 120$							
Crow with	прочные	$120 > R_c \ge 50$							
Скальные	средней прочности	$50 > R_c \ge 15$							
	малопрочные	$15 > R_c \ge 5$							
	пониженной прочности	$5 > R_c \ge 3$							
Полускальные	низкой прочности	$3 > R_c \ge 1$							
	очень низкой прочности	$R_c < 1$							

 полученная Е.С. Григорчуком для тонкодисперсных отложений (использованная в нашем случае для песчаноглинистых грунтов):

$$E_{def} = 0,06E + 4,88; \tag{3}$$

2) полученная А.И. Савичем для карбонатных пород (использованная в нашем случае для известняков):

$$E_{def} = 0,04337 \cdot E^{1,157}$$
. 4)

На основе предельного значения модуля деформации средне- и слабодеформируемых пород по ГОСТ 25100-2011 (табл. 2.), равного 50 МПа, на сейсмическом разрезе в районе изолинии 50 МПа был выделен участок деформируемых грунтов, приведенный на рис. 9.

Разрез в изолиниях значений предела прочности на одноосное сжатие

Предел прочности на одноосное сжатие Rc (МПа) относится к разряду прочностных характеристик горных пород. Физически он представляет собой напряжение, которое должно быть приложено к образцу стандартной формы и размеров, чтобы привести его к разрушению.

Возможность существования достаточно тесной связи между пределом прочности на одноосное сжатие и скоростью распространения упругих волн была показана в 1964 году Ф.М. Ляховицким, который предложил следующую формулу для расчета R_c :

$$R_c = \frac{V_s^2 \rho}{C} \tag{5}$$

где *С* — постоянный коэффициент, зависящий от типа породы.

С помощью формулы (5) было рассчитано поле значений предела прочности на одноосное сжатие. При этом использовался коэффициент C = 240. На основе значений Rc по ГОСТ 25100-2011 (табл. 3) на исследуемом разрезе были выделены зоны повышенной прочности. Они обнаружились только на некоторых отдельных участках (рис. 10).

Итоговый инженерногеологический разрез с выделенными инженерногеологическим элементами

На основании границ, выявленных на разрезах в изолиниях модуля деформации и предела прочности на одноосное сжатие, был построен итоговый инженерно-геологический разрез (рис. 11).

Таблица 4

№ ИГЭ	<i>V_p</i> , м/с			<i>V_s</i> , м/с			V_s/V_p			σ			<i>Е</i> , МПа			E_{def} , МПа			<i>R</i> _c , МПа		
	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	Makc.
1	600	1100	1600	250	325	400	0,25	0,30	0,42	0,39	0,45	0,47	331	583	892	35,7	68,7	112,4	0,5	0,8	1,3
2	1600	1863	2125	400	575	750	0,25	0,30	0,35	0,40	0,41	0,43	984	2180	3376	126,0	325,1	524,2	1,4	3,1	4,9
3	2125	2413	2700	750	925	1100	0,35	0,38	0,41	0,43	0,44	0,46	3376	5246	7117	524,2	939,6	1355,0	4,9	7,8	10,6
4	2200	2500	2800	1200	1250	1300	0,46	0,50	0,55	0,29	0,33	0,36	8904	10000	11053	1610,2	1841,6	2067,8	14,4	15,6	16,9

Сводная таблица рассчитанных упругих и прочностных характеристик инженерно-геологических элементов, выделенных по данным сейсморазведки

На этом разрезе подошва слоя тонкодисперсных отложений (ИГЭ 1) проведена по изолинии 50 МПа в поле значений модуля деформации (рис. 9), что согласуется с результатами описания колонок скважин № 201 и 224. Рыхлые отложения ИГЭ 1 представлены на разрезе слоем мощностью от 5 до 15 м.

Глубже залегает слой выветрелых и закарстованных известняков со значениями предела прочности на одноосное сжатие не более 5 МПа, что согласно ГОСТ 25100-2011 соответствует скальным породам низкой и пониженной прочности (ИГЭ 2). То есть бо́льшая часть массива известняков здесь разрушена до потери прочности. Этот слой распространен на всем исследуемом разрезе и обладает мощностью не менее 25 м.

ИГЭ 3 представляет собой слой выветрелых и закарстованных известняков со значениями предела прочности на одноосное сжатие не более 15 МПа, что согласно ГОСТ 25100-2011 соответствует малопрочным скальным породам. Этот слой распространен на всем исследуемом разрезе и обладает мощностью не менее 15 м.

ИГЭ 4 соответствует известнякам средней прочности с $R_c \ge 15$ МПа (граница между инженерно-геологическими элементами 3 и 4 проведена по изолинии $R_c = 15$ МПа). Как видно из представленного разреза, сохранные известняки ИГЭ 4 на исследуемых глубинах распространены локально, что позволяет судить о высокой степени развития карста на рассматриваемом переходе через реку Ухта. То есть карстоопасным является весь исследуемый участок.

Таким образом, проведенные изыскания позволяют сделать вывод о развитии карста на протяжении всего рассматриваемого профиля и о необходимости дополнительных более детальных исследований.

В сводной таблице 4 представлены рассчитанные упругие и прочностные



Рис. 10. Сейсмический разрез в изолиниях значений предела прочности на одноосное сжатие R_c . Шаг изолиний — 2,5 МПа; отношение вертикального масштаба к горизонтальному — 1:2; красная линия — уточненная граница между инженерно-геологическим элементами 2 и 3; синяя линия — то же между ИГЭ 3 и 4.



Рис. 11. Итоговый инженерно-геологический разрез с выделенными ИГЭ, определенными по характеру распределения значений модуля деформации и предела прочности на одноосное сжатие. Отношение вертикального масштаба к горизонтальному — 1:2

характеристики инженерно-геологических элементов, выделенных по данным сейсморазведки.

Выводы

Возможности и задачи сейсморазведки при исследовании карста не исчерпываются картированием кровли карстующихся пород и ее рельефа. Многоволновой подход в сейсморазведке в данном случае состоит в получении разрезов в изолиниях скоростей распространения продольных и поперечных волн, что позволяет рассчитывать такие характеристики среды, как предел прочности на одноосное сжатие и модуль деформации. С учетом того что формулы связей между этими характеристиками и значениями скоростей продольных и поперечных волн носят корреляционный характер, их расчет позволяет выполнять основную функцию сейсморазведки — выявлять свойства среды между точками независимых определений (скважинами). В любом случае, разрезы в изолиниях этих характеристик позволяют судить об относительных изменениях прочностных и деформационных характеристик карстующихся пород по горизонтали и по вертикали. 🗞

Список литературы

- 1. Голубев А.А., Рабинович Г.Я. Результаты применения аппаратуры акустического каротажа для определения прочностных свойств горных пород на месторождениях твердых полезных ископаемых // Разведочная геофизика. 1976. Вып. 73.
- 2. *Ермаков А.П.* Глубинное строение Черноморской впадины по результатам новой интерпретации сейсмических данных: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М. 2005. 18 с.
- 3. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмики. М.: Изд-во МГУ, 1981. 176 с.
- 4. Пийп В.Б. Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций // Физика Земли. 1991. № 10. С. 24–32.
- 5. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / под ред. Н.Н. Горяинова. М.: Недра, 1992. 264 с.
- 6. *Савич А.И., Ященко З.Г.* Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 214 с.
- 7. Тер-Мартиросян З.Г. Механика грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2005. 488 с.