

УДК 550.834.3/.5:(556.3:551.79)(470.631)

СЕЙСМОРАЗВЕДКА – ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИ ПОИСКАХ РЕЗЕРВУАРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Б. А. Канарейкин, Е. Ю. Гошко, Е. В. Мосягин, А. С. Сальников, А. В. Сагайдачный

Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

Выполнены инженерно-сейсмические исследования верхней части геологического разреза в долине р. Теберда (Карачаево-Черкесская республика) с целью поиска перспективных резервуаров подземных вод. В результате сейсмических исследований с использованием преломленных и отраженных волн установлено строение четвертичных отложений, выполняющих ложе долины, получена их литолого-гидрогеологическая стратификация. Сейсмотомография по параметру V_s/V_p (отношение скорости поперечной волны к продольной) позволила выделить в разрезе четвертичных отложений наиболее перспективные гидрогеологические структуры.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, продольные преломленные и отраженные волны, сейсмотомография, четвертичные отложения, водоносный горизонт, горная река Теберда.

SEISMIC EXPLORATION AS AN EFFICIENT INSTRUMENT IN SEARCHING FOR GROUNDWATER BODIES UNDER MOUNTAIN CONDITIONS

B. A. Kanareikin, E. Yu. Goshko, E. V. Mosyagin, A. S. Salnikov, A. V. Sagaidachny

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

Engineering and seismic studies of the shallow subsurface in the valley of the Teberda River (Karachay-Cherkess Republic) have been carried out with the aim to search for promising groundwater bodies. Seismic refraction and reflection studies have allowed for establishing a structure of the Quaternary deposits filling the valley floor, and obtaining their litho-hydrogeological stratification. Seismic tomography by the V_s/V_p parameter (S-P velocity relationship) has made possible the identification of the most promising hydrogeological structures in the Quaternary deposit section.

Keywords: engineering seismology, longitudinal refracted and reflected waves, seismic tomography, Quaternary deposits, aquifer, Teberda River.

DOI 10.20403/2078-0575-2018-1-110-116

Проблема снабжении населения качественной питьевой водой всегда требует особого внимания, особенно в некоторых районах Российской Федерации. В 2016 г. в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН было проведено совещание по проблеме гидрогеологии и качества питьевой воды (<https://union.nsu.ru/news/category/science/>), на котором отмечалось, что в Новосибирской области есть районы, где питьевой воды недостаточно.

Схожие проблемы возникают и в других районах России, в частности, в Карачаево-Черкесской республике, где при кажущемся изобилии водных ресурсов 46 % населения используют питьевую воду, не отвечающую санитарно-эпидемиологическим требованиям. В ноябре 2016 г. СНИИГГиМС по заданию Росгеологии выполнил инженерно-сейсмические исследования в высокогорной долине р. Теберда, расположенной на склоне Передового хребта в Карачаево-Черкесии (рис. 1).

В задачи работ входило прослеживание верхней границы грунтовых вод и поиск участков палеодолин (переуглублений), сложенных грубообломочными и песчаными водонасыщенными отложениями четвертичного возраста.

Четвертичные отложения в районе работ распространены преимущественно в пределах пойм,

пойменных и надпойменных террас р. Теберда и ее притоков. Условно принято возрастное деление отложений на две толщи: нерасчлененную верхнеплейстоцен-нижнеголоценовую переуглублений (Q_{III-IV}^1) и верхнеголоценовую пойм и современных русел (Q_{IV}^2). Разрез аллювия слагают в основном валунно-галечниково-гравийные отложения русловых фаций с песчаным или песчано-глинистым заполнителем, а также разнозернистые пески с включениями гальки. Ниже по разрезу, как правило, отмечается увеличение содержания глинистого материала [5].



Рис. 1. Сейсмические работы в долине р. Теберда

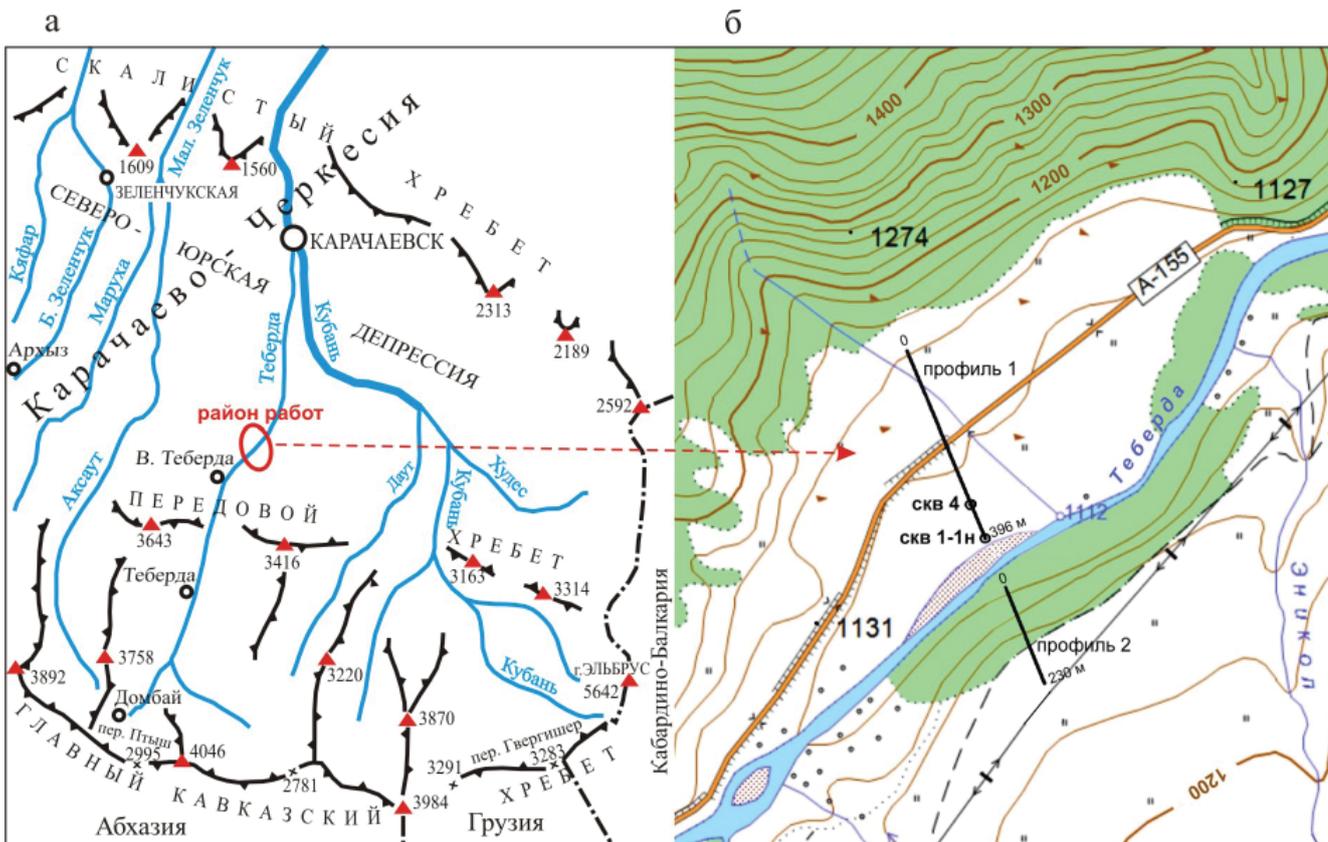


Рис. 2. Район сейсмических работ: а – орография бассейна р. Кубань, б – схема расположения сейсмических профилей

Окрестность пос. Верхняя Теберда, где были проведены работы, относится к высокогорью, в пределах которого часто встречаются отложения переуглублений ледникового выпайивания (гляциальные отложения). Ложе долины представлено дислоцированными карбонатно-терригенными породами палеозойского возраста ($D_{2-3}-P_1$). Глубина залегания кровли коренных пород на участках переуглублений долины достигает 100 м и более [1, 5].

Для решения поставленной задачи при сейсмических работах применялся метод ОГТ, позволяющий использовать при обработке материала как отраженные, так и преломленные волны. Сейсмические наблюдения регистрировались 97 приемными устройствами, расставленными вдоль линии профиля на длину 192 м с шагом 2 м, расстояние между пунктами возбуждения колебаний 4 м.

Инженерно-сейсмические работы выполнялись телеметрической сейсмостанцией РОСА® (Россия, разработка СНИИГГиМС) [6]. Длительность сейсмозаписи 2 с, шаг дискретизации 1 мс. Наблюдения выполнялись на Z-компоненте с использованием геофонов GS-20DX. Применено ударное возбуждение упругих колебаний кувалдой весом 6 кг с использованием 4–6 накоплений воздействий.

Работы выполнены по двум профилям, расположенным на левобережье (профиль 1) и правобережье (профиль 2) р. Теберда около пос. Верхняя Теберда (см. рис. 1). Общая длина профилей 630 м. Профиль 1 расположен в предгорье и пойме р. Те-

берда, профиль 2 пересекает две надпойменные террасы (рис. 2).

На всех сейсмограммах получены четкие сейсмозаписи продольных (P) прямых и преломленных волн. Преобладающая частота записи 90–120 Гц. Во вторых вступлениях во многих случаях уверенно выделялась низкочастотная поперечная (S) волна, а также продольные отраженные волны ($P_{отр}$) (рис. 3).

Обработка полученных сейсмических материалов проводилась с использованием как преломленных, так и отраженных волн. Для изучения строения верхней части разреза четвертичных отложений были использованы первые вступления продольных волн. Построение сейсмических раз-

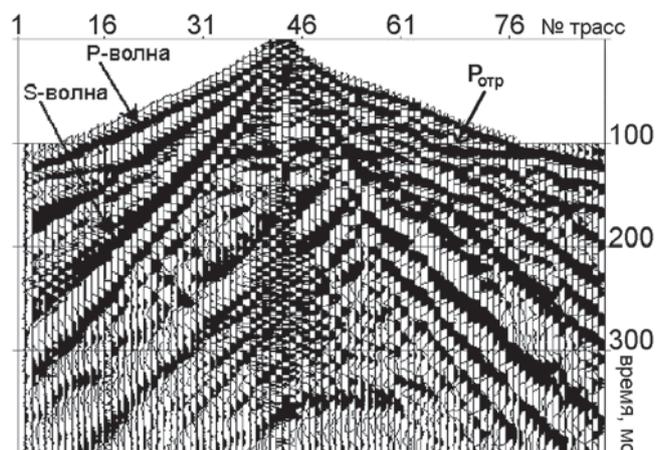


Рис. 3. Прослеживание P- и S-волн на сейсмограмме



резов по продольным преломленным волнам проводилось способом послышной интерпретации годографов первых вступлений [3] и с применением программного комплекса ProMaxSeisSpace 5000 и модуля «RefractionStaticsCalculation», вычисляющего скорость в преломляющем слое и времена запаздывания.

Первичная обработка годографов первых вступлений показала двуслойное строение верхней части разреза: были выделены две преломленные волны. Первая из них отождествляется с подошвой зоны малых скоростей.

Для отображения особенностей прослеживания преломленных волн с помощью программного комплекса были построены временные разрезы отдельно для каждой из них. На первом этапе, по сейсмограммам общего пункта возбуждения были определены интервалы прослеживания для каждой волны и измерены граничные скорости. Для более корректного определения скорости в сейсмограммы предварительно были введены статические поправки за рельеф. Выбранные интервалы удалений послужили базой для последующего суммирования. Для обеспечения спрямления осей синфазности преломленных волн и нахождения t_0 применялась редукция по закону $t_{ред} = t_0 - x/V_r$, где $t_{ред}$ – редуцированное время; x – удаление источник-приемник; V_r – граничная скорость. Редуцированные трассы, соответствующие выбранному диапазону удалений, для отображаемой границы суммировались. Координата полученной суммотрассы относилась к середине базы в данном наборе удалений. Ввиду ожидаемой гладкости и субгоризонтальности преломляющих границ построение указанных временных разрезов было выполнено только с использованием одного (правого) фланга сейсмограмм общего пункта возбуждения.

Характер прослеживаемости преломляющего горизонта, связанного с подошвой зоны малых скоростей, показан на временном сейсмическом разрезе по профилю 1 (рис. 4, б). Граничная скорость по подошве зоны малых скоростей изменялась от 500–600 на пойменных участках до 700–1000 м/с в предгорьях и на надпойменных террасах; ее значения соответствуют скорости продольных волн в неводонасыщенных валунно-галечниково-гравийных грунтах [4]. Скорость продольных волн (V_p) в зоне малых скоростей на различных участках разреза изменялась от 260 до 420 м/с, мощность слоя – от 2 до 8 м, а мощность слоя между подошвой зоны малых скоростей и второй преломляющей границей – от 2 до 20 м.

Второй преломляющий горизонт характеризуется граничной скоростью 2300–2600 м/с и отождествляется с кровлей первого водоносного горизонта (ВГ) (см. рис. 4, в), что соответствует водонасыщенным валунно-галечниково-гравийным отложениям с песчаным или глинисто-песчаным заполнителем [4]. На профиле 2 границу ВГ по данным преломленных волн удалось проследить только в его начальной части. В пределах второй над-

пойменной террасы преломленная волна от этого горизонта в первые вступления не вышла. Поверхность водоносного горизонта здесь была прослежена по разрезу ОГТ.

Разрезы ОГТ продольных отраженных волн построены с использованием стандартного графа обработки сейсмических материалов в программном комплексе ProMaxSeisSpace 5000. Граф обработки состоял из набора процедур, включавших расчет статических поправок по данным преломленных волн, поверхностно-согласованную деконволюцию, подавление высокоамплитудных помех, подавление широкого спектра поверхностных волн-помех. Далее был проведен интерактивный анализ кинематических поправок, результатом которого стали эффективные скорости суммирования $V_{ОГТ}$. Временной сейсмический разрез строился от рельефа дневной поверхности (см. рис. 4, г). Пересчет временного разреза в глубинный проводился с использованием средней скорости $V(t, x) = 0,8V_{ОГТ}(t, x)$ по полученному временному разрезу скорости $V_{ОГТ}(t, x)$.

Волновое поле на разрезах ОГТ контрастно разделяется на две различные сейсмофациальные области. Верхняя ($t_0 \leq 100$ мс) характеризуется интенсивными субгоризонтальными и слабо наклонными отражателями. По привязке к скважинам она отображает строение четвертичных отложений. Наиболее выразительная по амплитуде отраженная волна отождествляется с кровлей верхнего ВГ. Для нижней сейсмофациальной области типичны круто наклонные отражающие площадки. Она может соответствовать сильно дислоцированным породам палеозойского возраста ($D_{2-3}-P_1$) [1, 5]. Границу резкого углового несогласия между этими областями следует рассматривать как кровлю средне-верхнедевонских – нижнепермских отложений (горизонт Ф).

В результате комплексной обработки сейсмических материалов с привлечением продольных преломленных и отраженных волн была получена геолого-геофизическая модель четвертичных отложений, выполняющих ложе долины р. Теберда (рис. 5). Выше уровня грунтовых вод разрез представлен аллювиальными отложениями (αQ_{IV}^2) в пойменной части профилей и пролювием (prQ_{IV}^2) в предгорьях и на надпойменных террасах.

Ниже уровня грунтовых вод в четвертичных отложениях по данным ОГТ выделяется несколько литологических комплексов. По привязке к скважинам 4-П и 1–1н горизонт ВГ является кровлей верхнего аллювиального комплекса. Этот комплекс следует отнести к наиболее перспективной гидрогеологической структуре. Максимальная его мощность 15–16 м. Подошвой верхнего аллювиального комплекса служит 2–3-метровый пласт глин, он же представляет собой кровлю нижнего аллювиального комплекса, сложенного песками с включениями гальки, который также следует рассматривать как перспективно водоносный. Максимальная мощность данного комплекса достигает 22 м.

Ниже аллювиальных комплексов с некоторой долей условности выделяются аллювиально-флювиогляциальный, флювиогляциальный и гляциальный комплексы, также водоносные, но степень их обводненности ниже, чем аллювиальных комплексов. По границе Ф фиксируются три депрессионные зоны (переуглубления) в ложе долины. В центральной зоне (интервал профиля 240–360 м) максимальная мощность четвертичных отложений составляет 94 м, в северо-западной – 58 м, в юго-восточной – 75 м. Переуглубление с наибольшей мощностью четвертичных отложений следует связать с начальным этапом формирования долины р. Теберда. Боковые переуглубления, скорее всего,

связаны со вторичными руслами либо с боковыми притоками.

Таким образом, комплексный анализ преломленных и отраженных волн позволил достичь более детального расчленения разреза четвертичных отложений и выделить водонасыщенную его часть.

Для более детальной оценки скоростного строения четвертичных отложений и характера их водонасыщенности были выполнены сейсмотомографические построения с использованием годографов продольных волн в первых вступлениях и рефрагированных поперечных волн в последующих вступлениях [2]. Сейсмотомографический разрез по параметру V_p подтвердил разделение толщи чет-

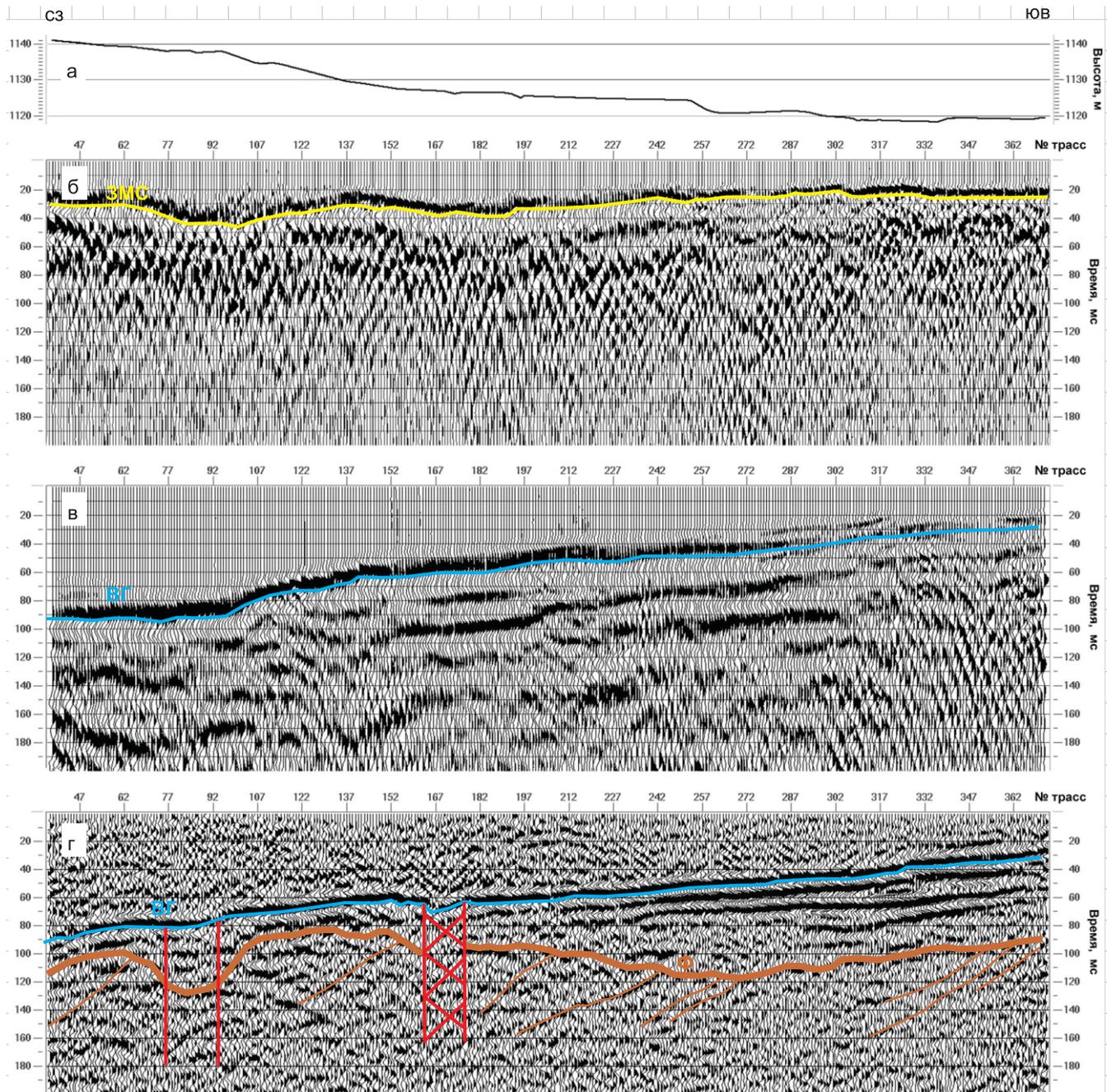


Рис. 4. Временные сейсмические разрезы по профилю 1: а – рельеф дневной поверхности; б – разрез преломленных волн от подошвы зоны малых скоростей (ЗМС); в – разрез преломленных волн от кровли водоносного горизонта (ВГ); г – разрез ОГТ продольных отраженных волн (Ф – поверхность коренных пород)

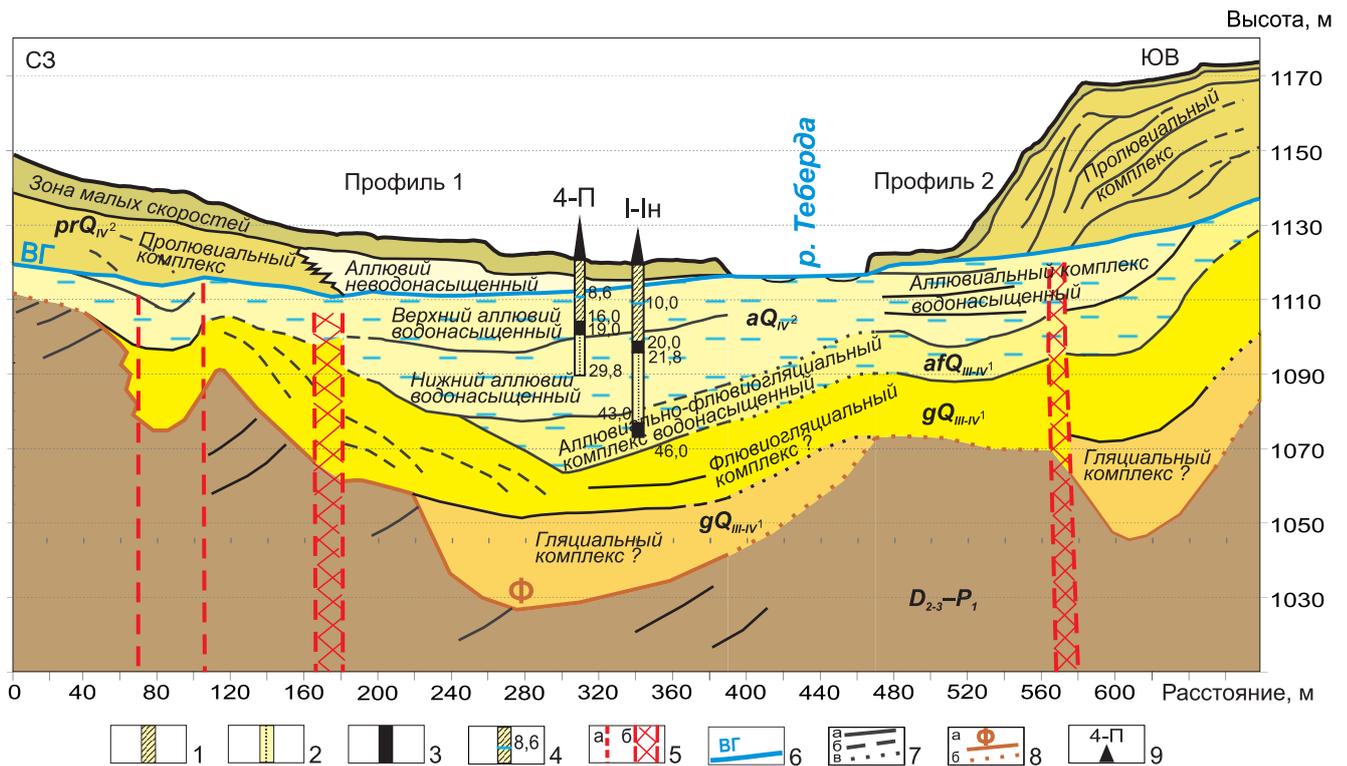


Рис. 5. Сводный геолого-геофизический разрез по профилям 1 и 2, Верхнетебердинский участок

1 – валунно-галечные отложения; 2 – пески; 3 – глина с включением гальки; 4 – отметка уровня воды в скважине; 5 – нарушенные зоны: а – локальные, б – большой мощности; 6 – первый водоносный горизонт; 7 – отражающие и преломляющие границы: а – уверенные, б – неуверенные, в – предполагаемые; 8 – поверхность коренных пород (Ф): а – уверенная, б – предполагаемая; 9 – скважина

вертикальных отложений на низко- ($V_p = 400\text{--}900$ м/с) и высокоскоростной ($V_p > 1700$ м/с) интервалы глубин (рис. 6, а). При этом низкоскоростная область расположена выше преломляющего горизонта ВГ.

На сейсмотомографическом разрезе по параметру V_s отмечается достаточно плавное возрастание значений V_s с увеличением глубины (см. рис. 6, б). В верхней части разреза (выше гра-

ницы ВГ) они составляют 200–450 м/с, что соответствует неводонасыщенным валунно-галечно-гравийным грунтам [4]. Ниже границы ВГ значения V_s увеличиваются до 500–750 м/с. Такие скорости свойственны водонасыщенным валунно-галечно-гравийным отложениям [4]. На участке 40–100 м по линии профиля в скоростном разрезе отмечается локальная аномалия пониженных значений V_s , которая согласуется с положением локальной депрессии горизонта Ф на геолого-геофизическом разрезе. Данный участок, вероятнее всего, следует связать с одним из более поздних русел р. Теберда.

Сейсмотомографический разрез по параметру V_s/V_p позволил получить представление о водонасыщенности четвертичных отложений (рис. 7). Толща, расположенная выше границы ВГ, характеризуется значениями $V_s/V_p = 0,35\text{--}0,65$, свойственными неводонасыщенным грунтам. Ниже границы ВГ располагаются четвертичные отложения, характеризующиеся значениями $V_s/V_p \leq 0,3$, которые отвечают водонасыщенным грунтам, в том числе и валунно-галечниково-гравийным [4].

Перспективность гидрогеологической структуры определяется фильтрационными свойствами грунтов и ее мощностью. Фильтрационные свойства водонасыщенных валунно-галечно-гравийных отложений зависят от литологии заполнителя. Наилучшими фильтрационными свойствами обладают грунты с минимальным содержанием заполнителя (промы-

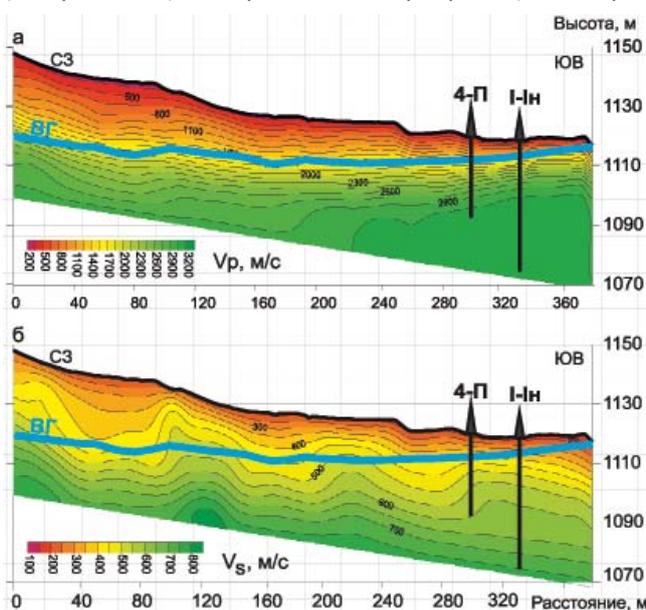


Рис. 6. Сейсмотомографические разрезы по профилю 1: а – параметр V_p ; б – параметр V_s

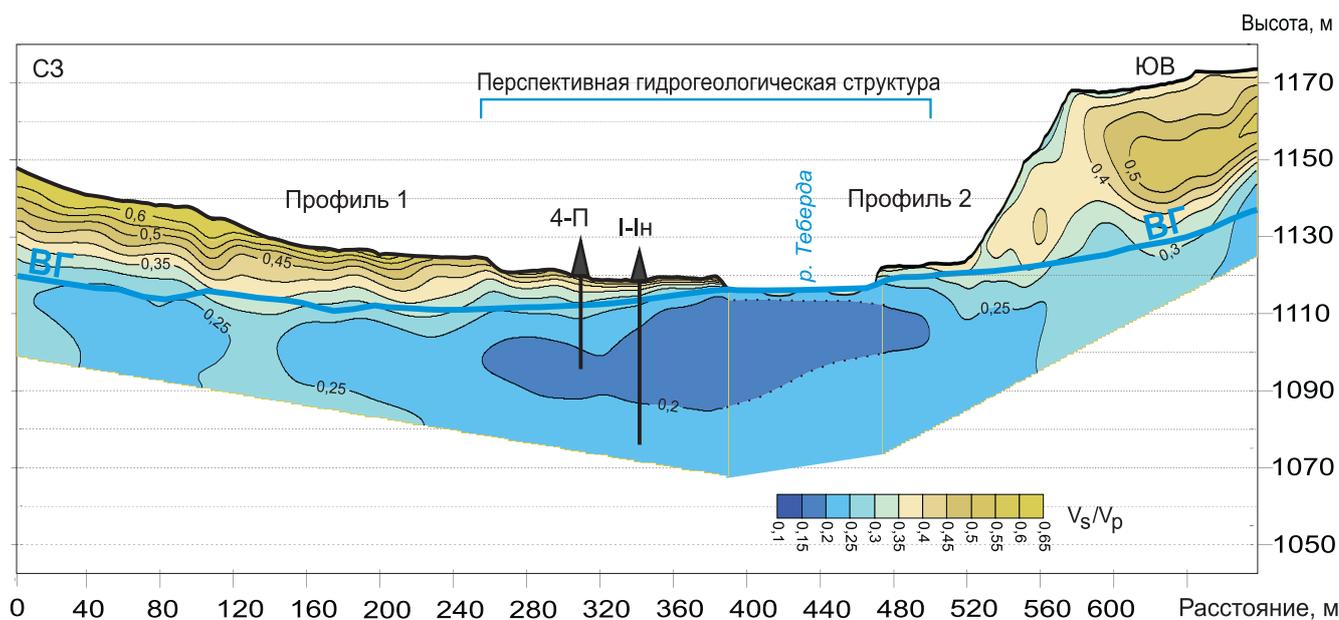


Рис. 7. Сводный сейсмотомографический разрез по параметру V_s/V_p (профили 1 и 2, Верхнетебердинский участок)

тые валунно-галечные отложения) или с песчаным заполнителем. Значения V_s/V_p для таких грунтов составляют 0,10–0,20. Валунно-галечно-гравийные грунты с глинистым заполнителем обладают пониженными фильтрационными свойствами. Значения параметра V_s/V_p для них повышены до 0,25. Таким образом, наиболее перспективными следует считать аллювиальные отложения (верхний и нижний комплексы), расположенные в пойменной части разреза ($V_s/V_p \leq 0,2$) с максимальной мощностью около 40 м. В пределах предгорья и надпойменных террас также отмечаются локальные зоны повышенной обводненности, связанные с аллювиальными отложениями, однако их фильтрационные свойства оцениваются ниже, чем в пойменной части р. Теберда.

Выводы

Выполненные в высокогорных условиях сейсмические наблюдения с использованием преломленных и отраженных волн позволили установить многопластовое строение четвертичных отложений, выполнить литолого-фациальную стратификацию отдельных комплексов, отображающую историческую последовательность формирования четвертичных отложений долины р. Теберда. Прослежена верхняя граница грунтовых вод. Значения граничной скорости по ней соответствуют водонасыщенным валунно-галечно-гравийным отложениям.

Определена глубина залегания коренных пород палеозойского возраста. На поверхности коренных пород выделены три палеодолины (переуглубления), в одной из них (центральной) мощность четвертичных отложений достигает 100 м.

Сейсмотомография по параметру V_s/V_p позволила оценить характер водонасыщенности выделенных литологических комплексов и спрогнозировать наиболее водобильные отложения с хорошими фильтрационно-емкостными свойствами.

Выполненные работы показали целесообразность комплексной интерпретации сейсмических данных на преломленных и отраженных волнах при работах по оценке резервуаров подземных вод в условиях сложнопостроенных горных речных долин.

В работе учтены замечания к. г.-м. н. О. В. Шигановой, которые способствовали улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Скифская. Лист К-37 (Сочи), К-38 (Махачкала), К-39: объяснительная записка / В. А. Лаврищев, А. А. Шейков, В. М. Андреев и др. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2011. – 431 с. + 8 вкл.
2. Канарейкин Б. А., Сагайдачная О. М., Дунаева К. А. Сейсмотомография верхней части разреза Восточно-Камчатского прогиба // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2011. – № 2. – С. 31–35.
3. Метод преломленных волн / А. М. Епинатьева, Г. М. Голошубин, Ал. Литвин и др. – М.: Недра, 1990. – 297 с.
4. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами / сост.: О. П. Аникин, Ю. В. Горшенин; одобрено Главтранспроектком. – М.: ЦНИИС, 1985. – 65 с.
5. Потапенко Ю. Я. Геология Карачаево-Черкесии: учеб. пособие. – Карачаевск, 2004. – 154 с.
6. Сейсмическая система сбора данных на основе регистраторов семейства РОСА / О. М. Сагайдачная, А. В. Сагайдачный, А. С. Сальников, А. Н. Шмыков // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 8. – С. 77–81.

REFERENCES

1. Lavrishchev V.A., Sheykov A.A., Andreev V.M., et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy



Federatsii. *Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokoloenie). Seriya Skifskaya. List K-37 (Sochi), K-38 (Makhachkala), K-39. Ob'yasnitel'naya zapiska.* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third edition). Scythian series. Sheet K-37 (Sochi), K-38 (Makhachkala), K-39. Explanatory note]. Saint Petersburg, VSEGEI Publ., 2011. 431 p. + 8 incl. (In Russ.).

2. Kanareikin B.A., Sagaidachnaya O.M., Dunaeva K.A. [Seismic tomography of the shallow subsurface of the Eastern-Kamchatka trough]. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki – Equipment and systems of exploration geophysics*, 2011, no. 2, pp. 31–35. (In Russ.).

3. Epinat'eva A.M., Goloshubin G.M., Litvin A.I., et al. *Metod prelomlennykh voln* [Refraction method]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 297 p. (In Russ.).

4. Anikin O.P., Gorshenin Yu.V. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu sostava, sostoyaniya i svoystv gruntov seismoakusticheskimi metodami* [Methodical recommendations on determining soil structure, state and properties by seismoacoustic methods] Moscow, TsNIIS Publ., 1985. 65 p. (In Russ.).

5. Potapenko Yu.Ya. *Geologiya Karachaevo-Cherkessii: ucheb. Posobie* [Geology of Karachayev-Cherkessiya: work-book]. Karachayevsk, 2004. 154 p. (In Russ.).

6. Sagaidachnaya O.M., Sagaidachny A.V., Salnikov A.S., Shmykov A.N. [A seismic system of data acquisition on the basis of POCA® family recorders]. *Razvedka i okhrana nedr – Mineral exploration and subsoil protection*, 2007, no. 8, pp. 77–81. (In Russ.).

© Б. А. Канарейкин, Е. Ю. Гошко, Е. В. Мосягин,
А. С. Сальников, А. В. Сагайдачный, 2017