

# Информативность скважинных геофизических методов при выборе местоположения основных сооружений ГЭС

© С. И. Дейнеко<sup>1</sup>, С. А. Выжва<sup>2</sup>, А. Н. Берневек<sup>1</sup>, 2017

<sup>1</sup>ГП КИИЗИ “Энергопроект”, Киев, Украина

<sup>2</sup>Институт геологии Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

Поступила 17 марта 2017 г.

Для вивчення стану масиву скельних порід на території розміщення ГЕС на р. Веле (Республіка Екваторіальна Гвінея) виконано геофізичні дослідження методами вертикального сейсмопрофілювання, міжсвердловинного просвічування та міжсвердловинної сейсмотомографії. На підставі отриманих даних виявлено суттєві відмінності у стані кристалічних порід на лівобережній та правобережній частинах території будівництва. На правобережній частині скельні породи більш збережені — близько 90 % порід міжсвердловинного простору характеризується швидкістю поширення поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) понад 4500 м/с, на лівобережній, приблизно для 70 % товщі ґрунтів ( $V_p$ ) є такою самою. За розрахунком узагальненого показника збереженості скельних порід отримано експрес-оцінку стану порід у масиві. У скельних породах виділено чотири підзони: А — надто сильного впливу розвантаження з дезінтеграцією порід до алювію; Б — сильного прояву розвантаження та вивітрювання; В — слабого прояву площинного вивітрювання та помірного прояву розвантаження; Г — породи практично не вивітрені, лише з ознаками лінійного вивітрювання по субвертикальних тектонічних порушеннях та великих тріщинах. За результатами міжсвердловинної сейсмотомографії також установлено, що більш порушені скельні породи характерні для лівобережної частини території будівництва. З урахуванням отриманих даних уточнено план розташування основних споруд ГЕС.

**Ключові слова:** вертикальне сейсмопрофілювання, сеймопрозвучування, сейсмотомографія, збереженість скельних порід, зональність скельних масивів.

**Введение.** На стадии проектирования ГЭС на р. Веле выполнен комплекс геофизических исследований для оценки состояния скальных пород с целью уточнения местоположения сооружений ГЭС. Геофизические исследования выполнены ГП КИИЗИ “Энергопроект” при участии сотрудников Киевского национального университета имени Тараса Шевченко в рамках договора о сотрудничестве.

В приповерхностной части территории исследований скальные породы представляют собой сложнопостроенные геологические среды, которые характеризуются резкой пространственной изменчивостью свойств, недостаточной четкостью и выдержанностью границ, разделяющих участки с различными свойствами, существенной

неоднородностью и анизотропностью свойств. Комплекс метаморфических пород разбит большим количеством разломов и связанных с ними зон трещиноватости, по которым произошло внедрение интрузий (два цикла) [Гидроэлектростанция ..., 2013].

С поверхности скальный массив перекрыт чехлом элювиально-делювиальных отложений (кора выветривания), который характеризуется различной мощностью, сложным строением, неоднородностью как по составу, так и по свойствам пород.

Неоднородность массива — понятие относительное и поэтому для инженерных целей важно знать неоднородность свойств элементов массива для оптимального размещения проектируемого сооружения.

При проектировании гидротехнических сооружений на массивах скальных пород необходимо знание свойств пород не только в образце, но и в условиях их естественного залегания. Получить подобную информацию методами геомеханики и инженерно-геологических изысканий практически весьма сложно, но эти исходные данные можно получить в результате геофизических исследований массива скальных пород.

Следует отметить, что геофизические исследования обладают рядом особенностей, выделяющих их среди других видов инженерно-геологических исследований:

- четкая взаимосвязь геофизических характеристик с основными геомеханическими (физико-механическими) показателями свойств геологической среды, используемыми при проектировании;
- стабильность определения характеристик скальных массивов, что позволяет использовать эти методы для режимных наблюдений за динамикой деформационных процессов в системе объект—скальный массив;
- получаемая с их помощью информация носит интегральный характер, т. е. относится к определенному объему (а не к “точке”) пород в естественном залегании. Характеристики свойств пород в образце и массиве могут различаться, что связано с дискретностью и трещиноватостью массива;
- в некоторых случаях информация о характеристиках массива может быть получена преимущественно с помощью геофизических методов (например, оценка неоднородности массива, определение динамических модулей упругости и др.).

**Методы.** Для изучения неоднородности массива и определения характеристик скальных пород выполнены сейсмоакустические исследования. Скальный массив является блочной средой, состоящей из различных по величине и форме блоков пород с существенно различными упругими свойствами, а следовательно, и характеризующимися разным средним уровнем скоростей продольных и поперечных волн. Блоки массива с повышенными значениями  $V_P$

(более 5000 м/с) и  $V_S$  (более 2000 м/с), как правило, отделяются друг от друга зонами пород с пониженными величинами скоростей упругих волн, которые приурочены к тектоническим нарушениям и оперяющихся их зонами трещиноватости. Эти зоны образуют в массиве сложную пространственную сетку, элементы которой имеют различную мощность, протяженность, внутреннее строение, а также характерный уровень  $V_P$  и  $V_S$ . Вблизи поверхности проявляется эффект общего и избирательного уменьшения величин  $V_P$  (менее 4000 м/с) и  $V_S$  (менее 1500 м/с) под действием факторов поверхностного выветривания и разгрузки. Поскольку эти факторы наиболее сильно изменяют свойства массива у поверхности и их действие постепенно затухает с глубиной, то вдоль поверхности массива образуется зона в целом градиентных изменений  $V_P$  и  $V_S$ .

Мощность и структура этой зоны существенно зависят от многих факторов, важнейшими из которых, по-видимому, являются состав, структура и физико-механические свойства пород, слагающих исследуемый массив, его напряженное состояние, возраст, поверхностный рельеф, климатические условия, наличие покрывающих четвертичных отложений, их обводненность и т. д. Нижняя граница указанной зоны является основной сейсмогеологической границей в поверхностных частях скальных массивов и, как правило, более или менее четко выделяется при наземных сейсморазведочных работах. Эта граница отображает начальную неоднородность строения и свойств массива, усиленную поверхностными процессами, она может иметь очень сложный рельеф и разделять участки с разными соотношениями скоростей. При распространении упругих волн вдоль такой границы могут иметь место эффекты дифракции и проникания волн, их фокусировки и рассеяния. Таким образом, учитывая конкретные инженерно-геологические условия, дифференциацию пород геологического разреза по физическим свойствам, для изучения геологического строения территории размещения сооружений ГЭС был выполнен комплекс скважинных сейсмоакустических исследований, в который входили: вертикальное сейсмическое

профилирование (ВСП), межскважинное сеймо-прозвучивание (МСП) и межскважинная сейсмическая томография (МСТ). Эти исследования выполнены в специально оборудованных скважинах, местоположение которых было выбрано с учетом размещения основных сооружений ГЭС.

**Результаты исследований.** На основании данных ВСП и МСП получены скоростные характеристики ( $V_P$  и  $V_S$ ) пород геологического разреза и выполнен расчет динамических упруго-деформационных и прочностных характеристик для выделенных инженерно-геологических элементов. Расчет указанных характеристик произведен по имеющимся, ранее установленным, зависимостям [Зинченко, 2005] с учетом особенностей геологического разреза исследуемой территории. Следует отметить, что массивы скальных пород весьма неоднородны по своим деформационным свойствам и большинство из них характеризуется значительной анизотропией. Различие в значениях скорости, измеренной по разным направлениям в анизотропных скальных массивах, может составлять 10—20 %. Таким образом, полученные расчетные значения упругодеформационных и прочностных характеристик могут отличаться от полученных по лабораторным испытаниям. Кроме того, расчетные данные характеризуют определенный объем исследованного массива, а не отдельный образец грунта.

Исследованный массив кристаллических пород подразделяется на зоны слаботрециноватых (скорость продольной волны более 4500 м/с); трещиноватых (скорость продольной волны 3500—4500 м/с) и сильнотрециноватых (менее 3500 м/с) пород. После выполнения статистической обработки результатов расчетов определены средние показатели деформационных и прочностных характеристик для инженерно-геологических элементов (табл. 1).

В практике инженерных изысканий для экспресс-оценки состояния пород в массиве часто используется обобщенный показатель степени сохранности скальных пород —  $q_c$ . Величина  $q_c$  определяется соотношением [Комплексные ..., 1990]:

$$q_c = \frac{P_{\text{м.и}}}{P_{\text{м.эт}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{м.эт}}$  — значение какого-либо параметра, который характеризует физико-механические свойства сохранного массива;  $P_{\text{м.и}}$  — текущее значение того же параметра, свойственное исследуемому участку. Показатель сохранности находят на основании значений скорости распространения продольных волн  $V_P$  и  $V_{P \text{ max}}$  согласно зависимости

$$q_{cv} \approx \left( \frac{V_P}{V_{P \text{ max}}} \right)^2. \quad (2)$$

Для оценки показателя сохранности пород  $q_{cv}$  выполнены расчеты по каждой скважине относительно  $V_{\text{max}} = 6500$  м/с. Связь между степенью трещиноватости пород, которая характеризуется величиной RQD (отношение общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см к длине пробуренного интервала в скважине, %) и показателем сохранности  $q_{cv}$  зависит от многих факторов, которые проявляются по-разному в различных массивах. В качестве *грубого приближения* можно считать, что  $RQD \sim q_{cv}$ , %. Параметр  $q_{cv}$  в практике инженерных изысканий используется для выделения в пределах исследуемых массивов зон, различающихся по своим свойствам и состоянию. В табл. 2 дана градация пород по степени их сохранности. Указанная градация в различных вариантах использовалась для расчленения массивов пород по степени их сохранности на гидротехнических объектах СССР. На основании значений скорости распространения продольных волн выполнен расчет  $q_{cv}$ . В результате расчетов получена экспресс-оценка состояния толщи кристаллических пород по данным скважинных исследований. Поверхностная зона выветрелых пород представляет собой в различной степени трещиноватые породы, которые характеризуются пониженными деформационными и прочностными свойствами.

По мере выхода скальных горных пород на дневную поверхность они подвергаются разрушающему воздействию комплекса экзогенных и эндогенных процессов: разгрузке естественных напряжений и, как следствие, расширению ста-

**Т а б л и ц а 1. Средние показатели деформационных и прочностных характеристик для выделенных инженерно-геологических элементов [Методика ..., 1991; Онищук, Выжва, 2017]**

Номер	Скорость		Плотность грунта $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E_d$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\mu$	Модуль сдвига $G$ , МПа	Модуль всестороннего сжатия $K$ , МПа	Статистический модуль упру- гости $E_c$ , МПа	Модуль общей деференци- ации $E_0$ , МПа	Предел прочности относного сжатия $\sigma_{сж}$ , МПа	Коэффициент крепости $f$	Сцепление $C$ , МПа
	$V_P$ , м/с	$V_S$ , м/с										
Кора выветривания латеритизированная — суглинисто-глинистый грунт, полутвердый и тугопластичный, с включением обломков кристаллических пород												
1	953	361	1880	694	0,42	245	1381	231	53			0,02
Кора выветривания латеритизированная — щебенисто-дресвяный грунт с суглинисто-глинистым заполнителем												
2	1004	468	1920	1143	0,36	420	1375	408	98			0,03
Скальный грунт сильно- и среднетрещиноватый, выветрелый и сильновыветрелый, средней прочности прочный (гнейс, гранодиорит, диабаз)												
3	3814	1888	2803	27 267	0,33	10 356	27 736	20 000	17 964	69	7	0,20
Скальный грунт слаботрещиноватый, слабоветрелый, прочный и средней прочности (гнейс, гранодиорит, диабаз)												
4	5226	2077	2804	34 235	0,40	12 288	60 771	30 000	23 245	82	9	0,24

рых и появлению новых трещин; физическому и химическому выветриванию; денудации; обрушению вследствие сейсмических процессов и т. д. Влияние всех этих процессов на массивы приводит к существенному изменению их физико-механических свойств, которое идет избирательно и зависит от состава пород, структуры массива, климата, форм и порядка рельефа и др. Это обуславливает вертикальную зональность скальных массивов по состоянию или степени сохранности образующих их пород в виде четырех подзон: А — очень сильного влияния разгрузки и выветривания с дезинтеграцией пород до элювия; Б, В и Г — соответственно сильного, среднего и слабого влияний этих процессов.

**Подзона А** — очень сильного проявления процессов выветривания массива. Породы сильно выветрены, дезинтегрированы до состояния щебня, дресвы с песчано-глинисто-суглинистым заполнителем.

**Подзона Б** — сильного проявления разгрузки и выветривания. Породы сохраняют облик своей структуры и текстуры, но сильно изменены по цвету (в частности, окрашены гидроокислами железа).

**Подзона В** — слабого проявления площадного выветривания и умеренного проявления разгрузки. Трещины здесь несколько

учащены и более раскрыты (по сравнению с подзоной Г).

**Подзона Г** — породы практически не выветренные, имеются лишь признаки линейного выветривания по субвертикальным тектоническим нарушениям и крупным трещинам.

Учитывая весьма сложное геолого-тектоническое строение территории исследований, выделение подзон является весьма проблематичным, особенно подзоны Г, которая, вероятно, залегает ниже глубины исследований (максимальная глубина геологических скважин менее 100 м).

Анализ полученных данных позволил расчленить геологический разрез на подзоны А, Б и В [Комплексные ..., 1990] в зависимости от степени трещиноватости и сохранности кристаллических пород (рис. 1). Следует отметить, что практически во всех случаях выделяется подошва подзоны Б (кровля подзоны В). В некоторых случаях эта граница менее четко выделяется по данным электроразведки в связи с тем, что точки ВЭЗ, данные которых использовали при составлении графиков, были расположены на некотором удалении от скважины (до 20—25 м).

Судя по полученным геофизическим данным, подзоны А и Б представляют собой в различной степени трещиноватые и измененные процессами выветривания горные породы, характеризу-

**Т а б л и ц а 2.** Относительные показатели свойств пород различных групп сохранности [Комплексные ..., 1990]

Номер группы сохранности	$D/D_{\max}$ , %	$\sigma_c/\sigma_{c \max}$ , %	$V_P/V_{P \max}$ , %	$q_{c v}$ , %	Характеристика состояния породы по [Зинченко, 2005]
IV <sub>2</sub>	100—70	100—70	100—95	100—90	Превосходное
IV <sub>1</sub>	70—52	70—46	95—87	90—75	Хорошее
III	52—25	46—23	87—70	75—50	Нормальное
II	25—11	23—8	70—50	50—25	Плохое
I	11—4	8—2,4	50—35	25—12,5	Очень плохое
0 <sub>2</sub>	4—1,5	2,4—0,5	35—25	12,5—6,2	Полускальная порода
0 <sub>1</sub>	1,5	0,5	25	6,2	Щебень, аллювий, древесина, дресва

ющиеся пониженными значениями скорости продольной волны ( $V_p$ ) от 400—500 м/с в верхней части зоны до 3500—5000 м/с у подошвы. Для зоны выветрелых и разгруженных пород характерен значительный разброс скоростей продольной волны ( $V_p = \pm 1000—2500$  м/с) около среднего их уровня (на заданной глубине), что свидетельствует о неоднородности этой зоны.

Для оценки состояния массива пород выполнена межскважинная сейсмотомография на левобережной территории, на участке размещения здания станции ГЭС (рис. 2, а) и участке размещения плотины (рис. 3).

Сейсмотомографические разрезы территории размещения здания ГЭС (рис. 2, б) характеризуются разнообразием распределения скоростей в исследуемом пространстве, а именно широким диапазоном изменения значений  $V_p$  и мощности верхней низкоскоростной толщи ( $V_p < 3500$  м/с). Разрез между скважинами 201—203 свидетельствует о сильнотрещиноватых породах. Предположительно, скважины находятся в пределах зоны тектонического нарушения. Исходя из особенностей распределения  $V_p$ , можно сделать вывод, что сильно разрушенные кристаллические породы прослеживаются, согласно предварительному плану, в пределах площадки здания ГЭС.

Кроме того, на левобережной части территории строительства выполнены исследования в пределах участка размещения плотины (см. рис. 3).

Результаты МСТ по левобережной и правобережной части территории размещения плотины приведены на рис. 4.

Межскважинное пространство скважин 41—42 характеризуется наличием зоны интенсивной трещиноватости (нарушения), здесь выделяется ксенолит в дайке диабазов [Технический ..., 2011]. Скважины 40—41 пробурены в более молодых интрузивных породах (дайковый комплекс), которые лучше сохранились по сравнению с окружающими их метаморфическими породами. Верхняя часть разреза представлена корой выветривания, ниже залегают трещиноватые кристаллические породы. С глубины

5—6 м скальные породы характеризуются высокой скоростью распространения продольных волн (более 6000 м/с), что свидетельствует о сохранном состоянии пород.

Скальные породы на правом берегу характеризуются как более сохранные. Особенностью сейсмотомографических разрезов является относительно спокойный характер распределения значений скоростей и малая мощность толщи с пониженными значениями  $V_p$ .

Более неоднородным представляется разрез между скв. 14—13 (см. рис. 4). Предположительно это обусловлено тем, что межскважинное пространство пересекает зона разлома (скв. 14 расположена в русле р. Веле). Более сохранные породы залегают в пространстве между скв. 10—11. В целом массив горных пород характеризуется наличием тектонических нарушений, трещиноватостью различной интенсивности, обусловленной процессами разгрузки.

**Выводы.** В результате сейсмоакустических исследований:

- выполнен расчет деформационных и прочностных свойств (см. табл. 1);
- определены свойства пород (см. рис. 1);
- составлены сейсмотомографические разрезы (см. рис. 2, б, 4, а, б), на которых отражено состояние пород в межскважинном пространстве.

Результаты межскважинной сейсмотомографии свидетельствуют о крайне сложном строении массива горных пород территории строительства ГЭС, который характеризуется трещиноватостью различной интенсивности, обусловленной тектоническими нарушениями.

На основании обобщенного показателя сохранности скальных пород получена экспресс-оценка состояния пород в массиве. Выполнено расчленение скальных пород на четыре подзоны:

- А — очень сильного влияния разгрузки с дезинтеграцией пород до элювия;
- Б — сильного проявления разгрузки и выветривания;
- В — слабого проявления площадного выветривания и умеренного проявления разгрузки;
- Г — породы практически невыветрелые, име-

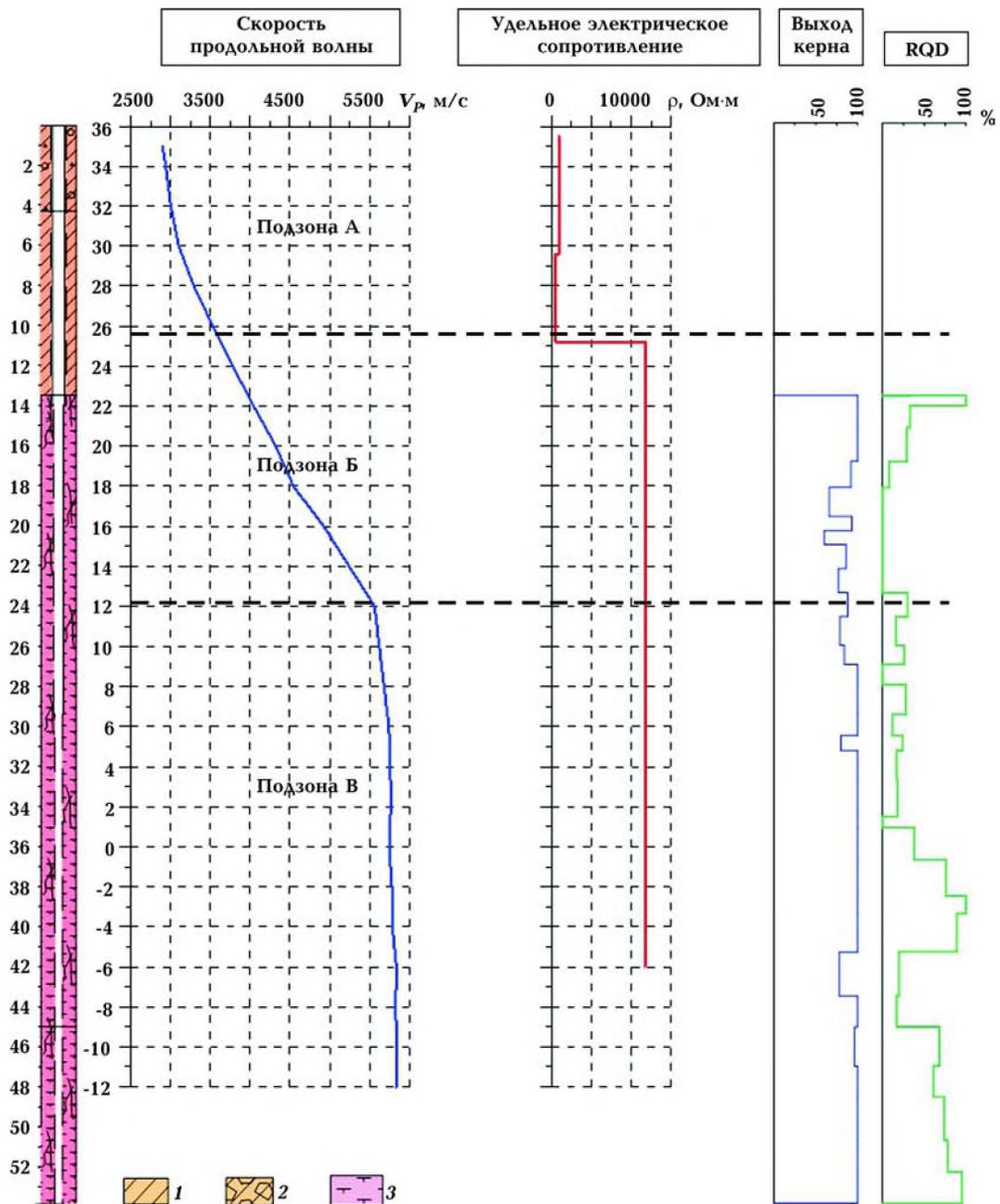
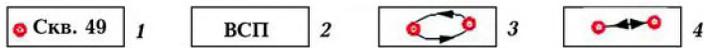
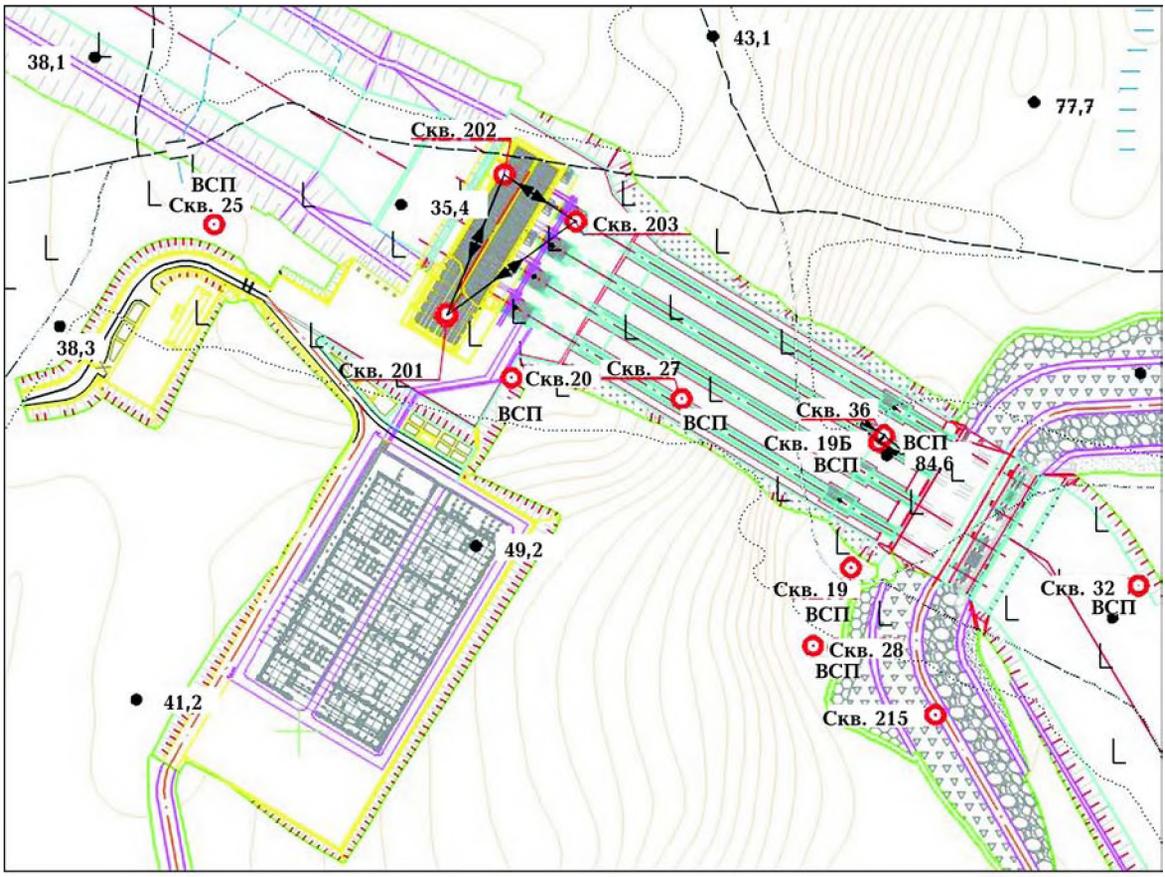


Рис. 1. Графики свойств пород межскважинного пространства (левый берег территории предполагаемого размещения здания ГЭС); RQD — степень трещиноватости пород (отношение общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см к длине пробуренного интервала в скважине, %): 1 — кора выветривания латеритизированная, каолинизированная (суглинок тяжелый, пылеватый, желтовато-бурый, красно-бурый, желтовато-серый, с включением дресвы, щебня, обломков кристаллических пород от 20 до 50 %, полутвердый и тугопластичный); 2 — кора выветривания латеритизированная, каолинизированная (щебенисто-глибовый грунт с суглинистым заполнителем до 45 %, встречаются отдельные глыбы слабовыветрелых кристаллических пород. Заполнитель — суглинок легкий, пылеватый, желтовато-бурый, желтовато-серый, тугопластичный); 3 — гнейс биотитовый, амфиболовый, биотит-амфиболовый, роговообманковый, средне-, мелкозернистый, от светло-серого до темно-серого, кварцполевошпатовый, сильно- и среднетрещиноватый, выветрелый и сильновыветрелый, средней прочности и прочный, местами с включением кристаллосланцев.



a

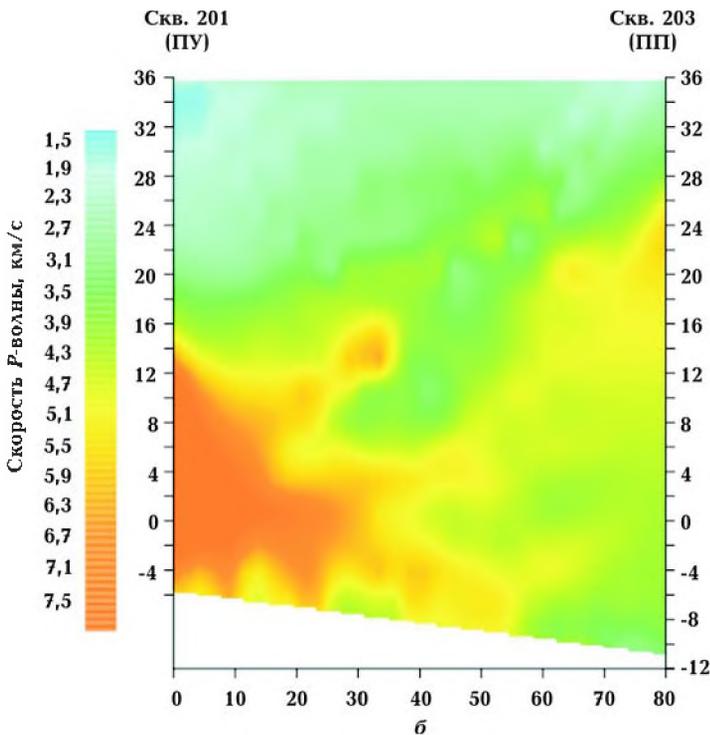


Рис. 2. Фрагмент карты (левый берег) с расположением скв. 201—203 (a) и сейсмотомографический разрез между скв. 201—203 (б), ПУ — пункт удара; ПП — пункт приема; 1 — скважина и ее номер; 2 — вертикальное сеймопрофилирование; 3 — межскважинное сеймопрозвучивание (Cross-Hole); 4 — сейсмическая томография 2D.

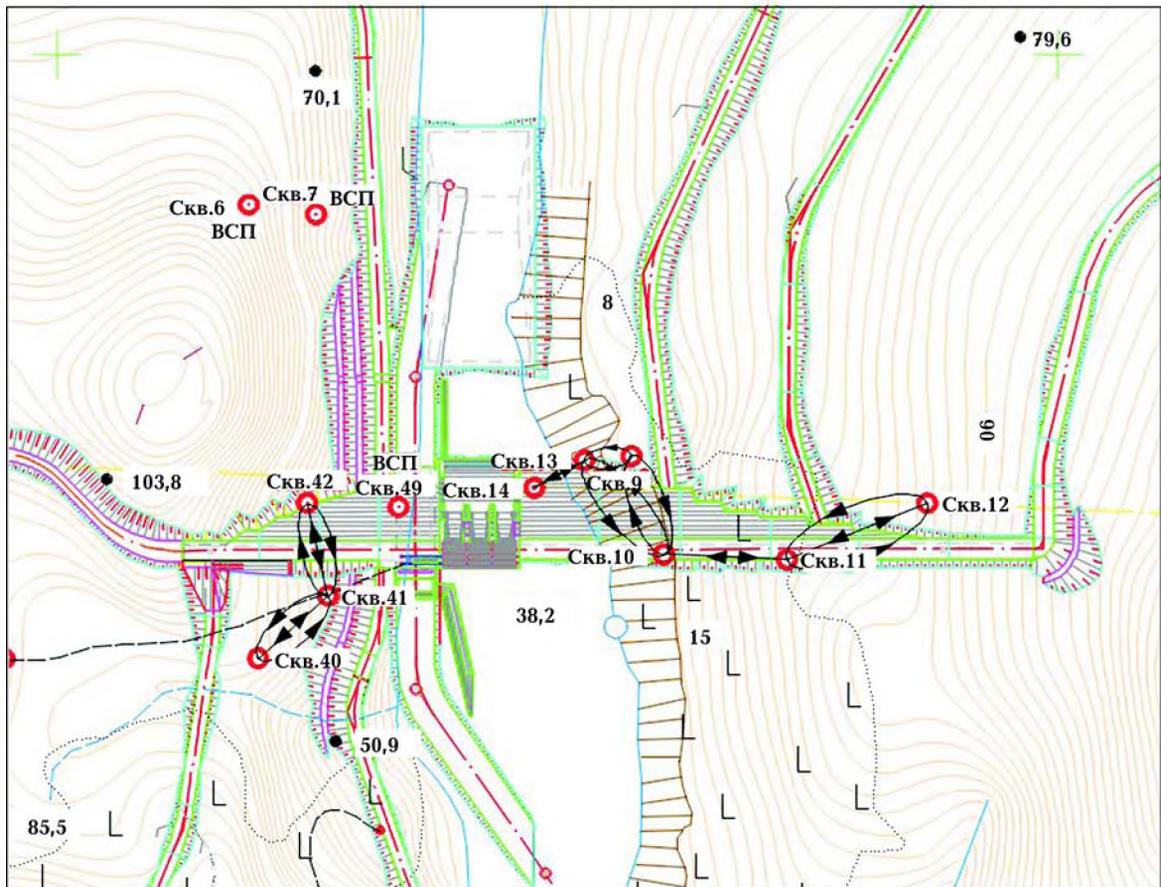
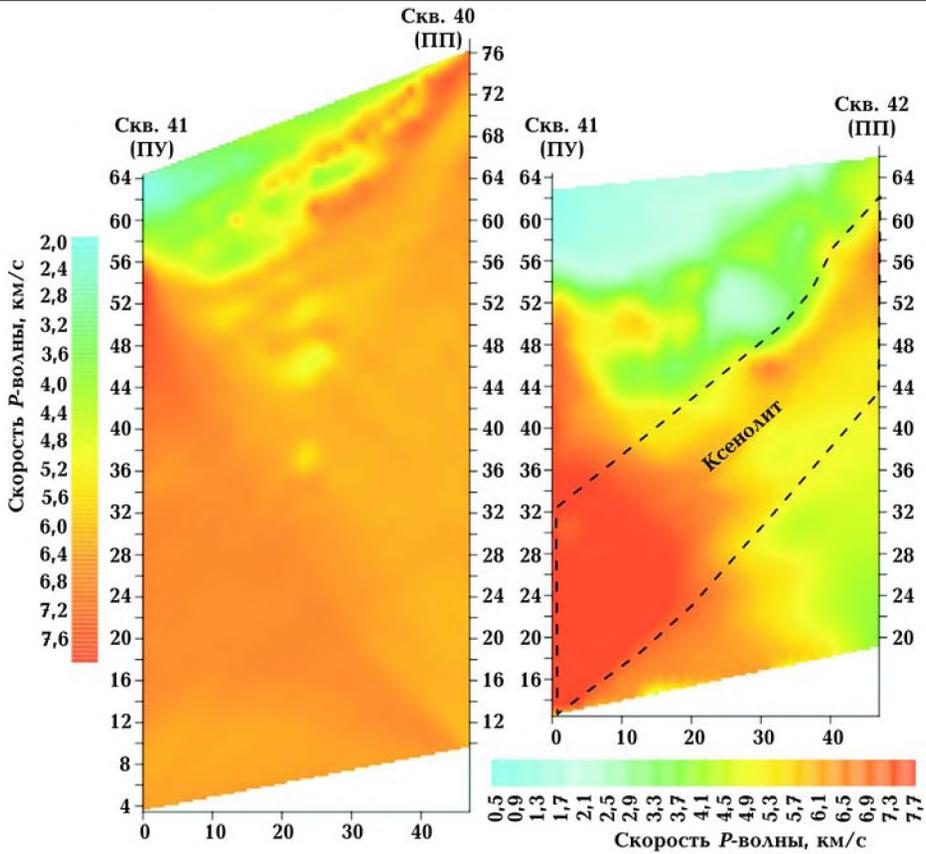
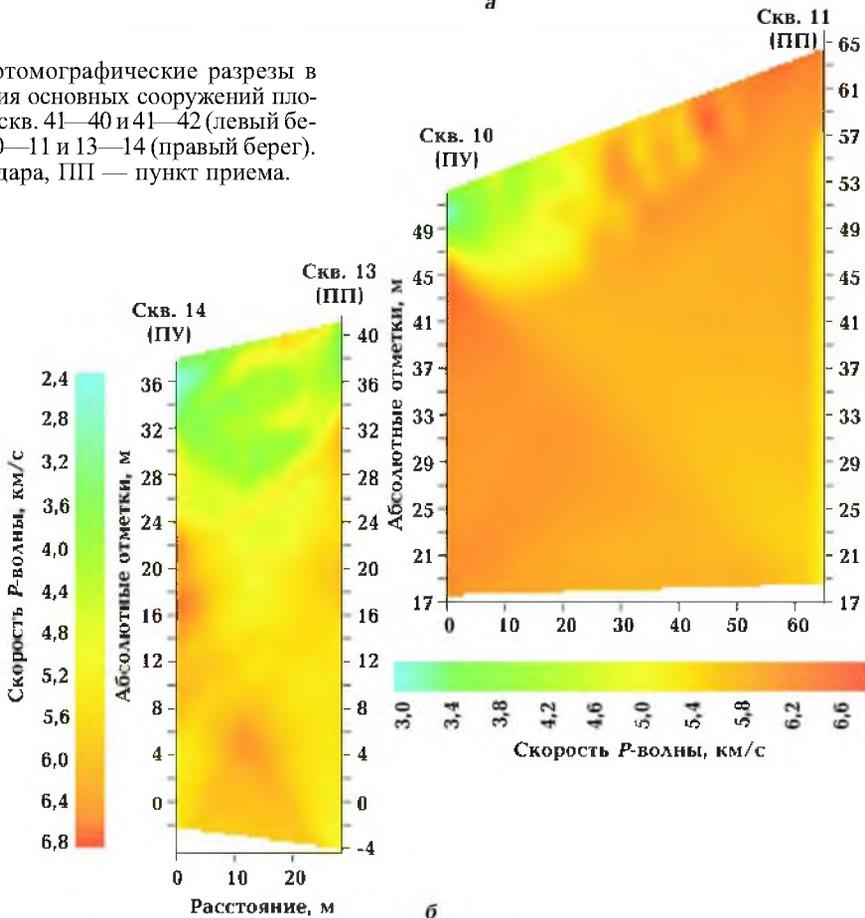


Рис. 3. Фрагмент плана расположения точек геофизических исследований в районе размещения основных сооружений плотины ГЭС: 1 — скважина и ее номер; 2 — вертикальное сеймопрофилирование; 3 — межскважинное сеймопрозвучивание (Cross-Hole); 4 — сейсмическая томография 2D.



а

Рис. 4. Сейсмотомографические разрезы в районе смещения основных сооружений плотины ГЭС: а — скв. 41—40 и 41—42 (левый берег), б — скв. 10—11 и 13—14 (правый берег). ПУ — пункт удара, ПП — пункт приема.



б

ются лишь признаки линейного выветривания по субвертикальным тектоническим нарушениям и крупным трещинам.

Результаты скважинных геофизических исследований учтены при корректировке плана размещения основных сооружений плотины ГЭС.

### Список литературы

- Гидроэлектростанция* Сендже на р. Веле в Республике Экваториальная Гвинея. Т. 3. Кн. 2. Технический отчет о результатах полевых геофизических исследований. Киев: ГП “КИИЗИ ЭП”, 2013. 50 с.
- Зинченко В. С.* Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных. Москва: Изд. АИС, 2005. 392 с.
- Комплексные инженерно-геофизические исследования* при строительстве гидротехнических сооружений. Под ред. А. И. Савича, Б. Д. Куюнджича. Москва: Недра, 1990. 462 с.
- Методика* составления геоструктурных схем (моделей) скальных массивов в основаниях гидросооружений: пособие к СНиП. 2.02.02-85. Ленинград: Изд. ВНИИГ, 1991. 163 с.
- Онищук И. И., Выжва С. А.* Экспресс-оценка строения геологического разреза территории размещения ГЭС геофизическими методами. *Вестник Киев. ун-та. Геология*. 2017. № 77. С. 12—18.

## Informativity of borehole geophysical methods in choosing the location of the main structures of the hydroelectric power plant (HPP)

© S. Deyneko, S. Vyzhva, A. Bernevek, 2017

To study the state of the rock massif on the territory of the HPP on the river Vele (Republic of Equatorial Guinea) geophysical surveys using vertical seismic profiling, inter-well seismic survey and inter-well seismic tomography are performed. On the basis of the data obtained, there are significant differences in the state of crystalline rocks on the left-bank and right-bank sections of the dam construction. On the right-bank part of the territory, rock is more secure (about 90 % of the inter-well-bore space under study is characterized by a longitudinal wave propagation velocity ( $V_p$ ) of more than 4,500 m/s. On the left bank, for approximately 70 % of the investigated soil thickness  $V_p$  is more than 4,500 m/s. The rock safety index allowed to obtain a rapid assessment of the state of the rocks in the massif, the rock was divided into four subzones: A — very strong unloading effect with the disintegration of rocks to eluvium, B — a strong manifestation of unloading and weathering, C — a weak manifestation of surface weathering and a moderate Manifestations of unloading, D — rocks are almost non-weathering, there are only signs of linear weathering in subvertical tectonic disturbances and large cracks. According to the results of the inter-well seismic tomography performed, it is also established that the more disrupted rocks are characteristic of the left-bank part of the construction site. Taking into account the obtained data, the plan for the location of the main structures of the dam of the hydroelectric power station is clarified.

**Key words:** vertical seismic profiling, seismic sounding, seismotomography, rock safety, zonal rock massifs.

### References

- Hydroelectric power station Senje on the river. Vele in the Republic of Equatorial Guinea. Vol. 3. Book 2. Technical report on the results of field geophysical studies, 2013. Kiev: State Enterprise “KIIZI EP”, 50 p. (in Russian).
- Zinchenko V. S.*, 2005. Petrophysical fundamentals of hydrogeological and engineering-geological interpretation of geophysical data. Moscow: AIS Publ. House, 392 p. (in Russian).
- Integrated engineering and geophysical research in the construction of hydraulic structures. Eds A. I. Savich, B. D. Kuyundzhich. Moscow: Nedra, 1990. 462 p. (in Russian).
- Methods of compiling geostructural patterns (models) of rock massifs in the foundations of hydroconstructions: the manual for SNiP. 2.02.02-85. Lenin-grad: VNIIG Publ. House, 1991. 163 p. (in Russian).
- Onishchuk I. I., Vyzhva S. A.*, 2017. Express assessment of the structure of the geological section of the territory of the location of hydropower stations by geophysical methods. *Vestnik Kiyevskogo universiteta. Geologiya* (77), 12—18 (in Russian).