

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОРАДАРНОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

КАЛАШНИК А. И., ДЬЯКОВ А. Ю., АБРАМОВ Н. Н.

*В работе рассмотрены подходы к комплексированию современных неразрушающих геофизических исследований по подконтурному зондированию насыпных грунтовых сооружений горного профиля для изучения их подповерхностной структуры и локализации зон различной водонасыщенности грунтов в их теле. Выполнен ряд натуральных экспериментов по синхронизированному в пространстве и времени зондированию ограждающей дамбы хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» разными волновыми методами: электромагнитным (с использованием георадарных технологий) и сейсмическим. Полученные результаты представлены в виде радарограммы скорости электромагнитной волны, сейсмограммы соотношения скоростей упругих волн и графиков их изменения по наиболее характерным сечениям. Выполнен сопоставительный анализ палитр радарограмм и сейсмограмм, а также количественных значений по трассам прохождения волн, который позволил более достоверно установить границы зон водонасыщения грунтов по георадарным данным. Выделены интервалы скоростей электромагнитной волны при переходе из сухих, плотных грунтов в увлажненные и далее в водонасыщенные, основываясь на отношении скоростей продольной и поперечной упругой волны сейсмического зондирования. Выполнен статистический анализ полученных электромагнитных и сейсмических данных, на основе которого вычислены коэффициенты корреляции значений скоростей, а также установлена корреляционная связь скорости прохождения электромагнитных волн в грунтах с их коэффициентом Пуассона. Тем самым обоснована возможность оценки коэффициента Пуассона грунтов непосредственно по данным их георадарного зондирования. Выполнено категорирование грунтов по их свойствам и водонасыщенности в разрезах дамбы в зависимости от скорости электромагнитной волны. Полученные результаты представляют основу для интерпретации данных георадарного зондирования при решении задач идентификации и локализации водонасыщенных участков в теле грунтовых сооружений с большей надежностью и технологичностью.*

**Ключевые слова:** *дамба; хвостохранилище; георадарное зондирование; сейсмическое зондирование; водонасыщение грунтов.*

Выявление водонасыщенных зон в ограждающих дамбах хвостохранилища является актуальной научно-практической задачей в первую очередь в части обеспечения устойчивости и функциональности такого грунтового гидротехнического сооружения. Недостаток данных, получаемых по сетям пьезометрических скважин на дамбах, не позволяет решать задачи необходимого информационного гидрографического обеспечения. Вместе с тем использование активных зондирующих геофизических методов мониторинга позволяет получать оперативную информацию о структурных особенностях сооружения и степени водонасыщенности слагающих их грунтов [1–5]. Многократными натурными экспериментами на дамбах хвостохранилищ и земляных плотин Кольского полуострова доказано, что комплексирование методов, использующих разную природу геофизических полей, позволяет существенно повысить достоверность полевых определений.

---

**Калашник Анатолий Ильич** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией геофлюидомеханики. 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Горный институт КНЦ РАН. E-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

**Дьяков Андрей Юрьевич** – научный сотрудник лаборатории геофлюидомеханики. 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Горный институт КНЦ РАН. E-mail: dyakov@goi.kolasc.net.ru

**Абрамов Николай Николаевич** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией теории и технологии подземного строительства. 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Горный институт КНЦ РАН. E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

В современной литературе отсутствуют данные о синхронном пространственно-временном зондировании дамбы хвостохранилища георадарным (электромагнитным) и сейсмическим методами. Идея данного исследования заключается, наряду с повышением достоверности георадарных определений, в обеспечении технологичности полевых измерений и использовании более простой методики георадиолокации для зондирования насыпных грунтовых гидротехнических сооружений [6]. Поэтому проведенная серия натурных экспериментов по синхронному зондированию ограждающих дамб различными по природе волновыми методами сама по себе является уникальной, а полученные результаты обладают новизной и оригинальностью. Цель проведения исследований – уточнение внутренней структуры дамбы и локализации зон различного водонасыщения грунтов. В качестве объекта был выбран наблюдательный полигон ограждающей дамбы № 1 хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК».

Основным параметром для определений и интерпретации при георадарном и сейсмическом зондировании насыпного грунтового сооружения является скорость распространения волн.

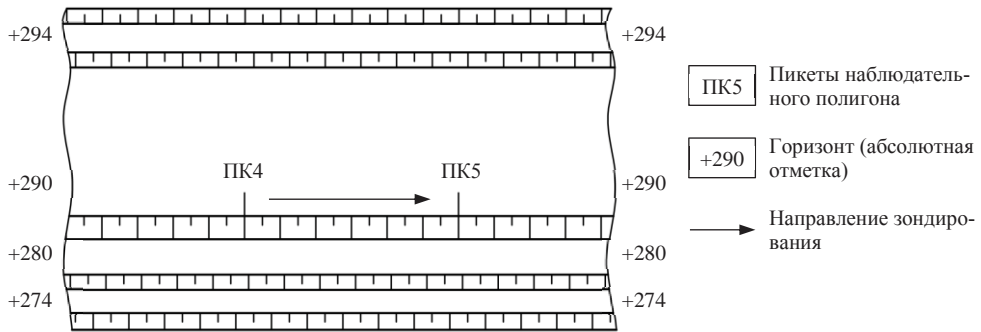


Рис. 1. Схема исследования дамбы георадарным и сейсмическим методами

При георадарном зондировании распространение электромагнитных волн в геологической среде (диэлектрике) описывается уравнениями Максвелла [7]:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\varepsilon \partial \vec{E}}{c^2 \partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0,$$

где  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\varepsilon$  – действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды (безразмерная величина);  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме, м/с;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость среды, Гн/м;  $\sigma$  – проводимость, См/м.

Одним из основных физических свойств сред, определяющим физику распространения электромагнитных волн, является диэлектрическая проницаемость сред  $\varepsilon$ . Эта характеристика в свою очередь напрямую связана с влажностью среды. На сегодняшний день известен целый ряд эмпирических выражений, определяющих эту связь. Например, для осадочных пород эти выражения имеют вид в широком диапазоне изменения влажности от 3 до 45 % и для сред с большей влажностью соответственно [7]:

$$\varepsilon = 3,03 + 9,3W_{\text{об}} + 14W_{\text{об}}^2 - 76,7W_{\text{об}}^3;$$

$$\varepsilon = \frac{720}{180 - W},$$

где  $W_{\text{об}}$  – объемная влажность, %;  $W$  – влажность, %.

Скорость распространения электромагнитных волн  $V$  в среде напрямую связана с действительной частью комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды [3]:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $\varepsilon$  – действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости массивов пород.

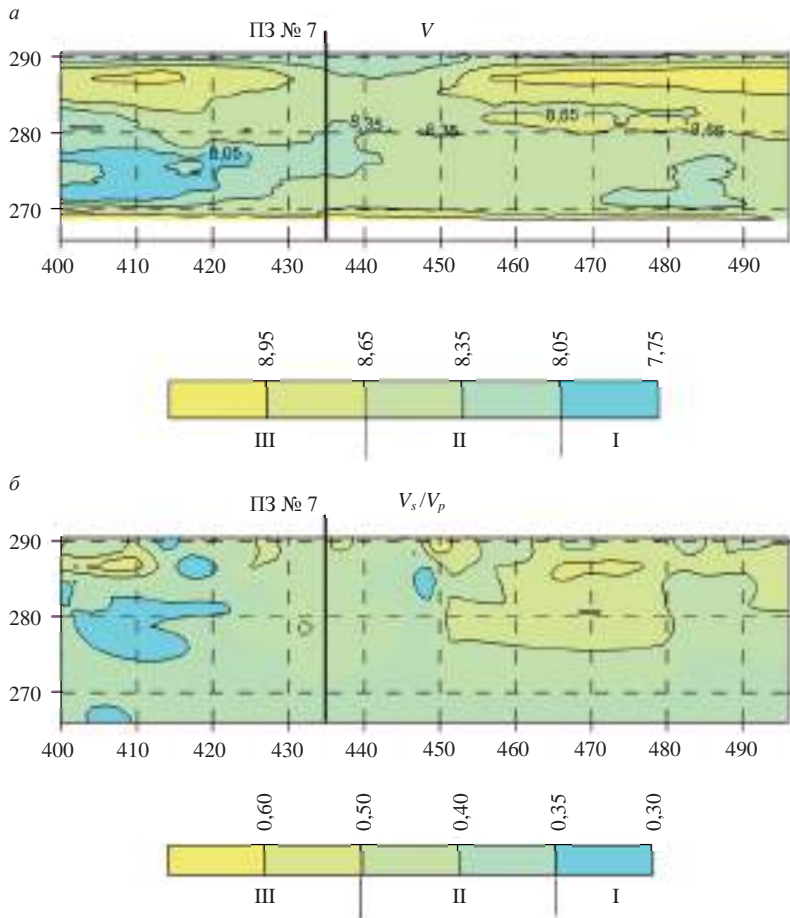


Рис. 2. Результаты синхронного зондирования дамбы георадарным (электромагнитным) – *а* и сейсмическим – *б* методами:  
I – водонасыщенные грунты; II – грунты плотные увлажненные; III – грунты плотные естественной влажности

Признаком роста влагонасыщения является увеличение  $\varepsilon$ , что в свою очередь приводит к падению скорости электромагнитной волны. Из-за сложности получения распределенных скоростных данных георадарного зондирования интерпретация в подавляющем большинстве случаев производится на основе детального анализа амплитудных, частотных и фазовых характеристик электромагнитного сигнала, сопоставления осей синфазности сигнала внутри выделенных на радарограмме участков или областей, которые отличаются друг от друга характером картины, поверхностями угловых несогласий, интенсивностью отражающих горизонтов.

Исследование состояния насыпного грунтового сооружения георадарным зондированием применяется на ограждающих дамбах хвостохранилищ Кольского полуострова [1–6]. Результаты зондирования обрабатываются с использованием специализированных компьютерных программ RadExplorer и ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, интерпретируются отдельно, а затем выполняется комплексный анализ полученных данных в пространственно-глубинной взаимосвязи [5, 6]. Задача настоящих исследований состояла в адекватном определении границ зон водонасыщения по данным георадарного зондирования, для этих целей были использованы возможности сейсмических методов контроля.

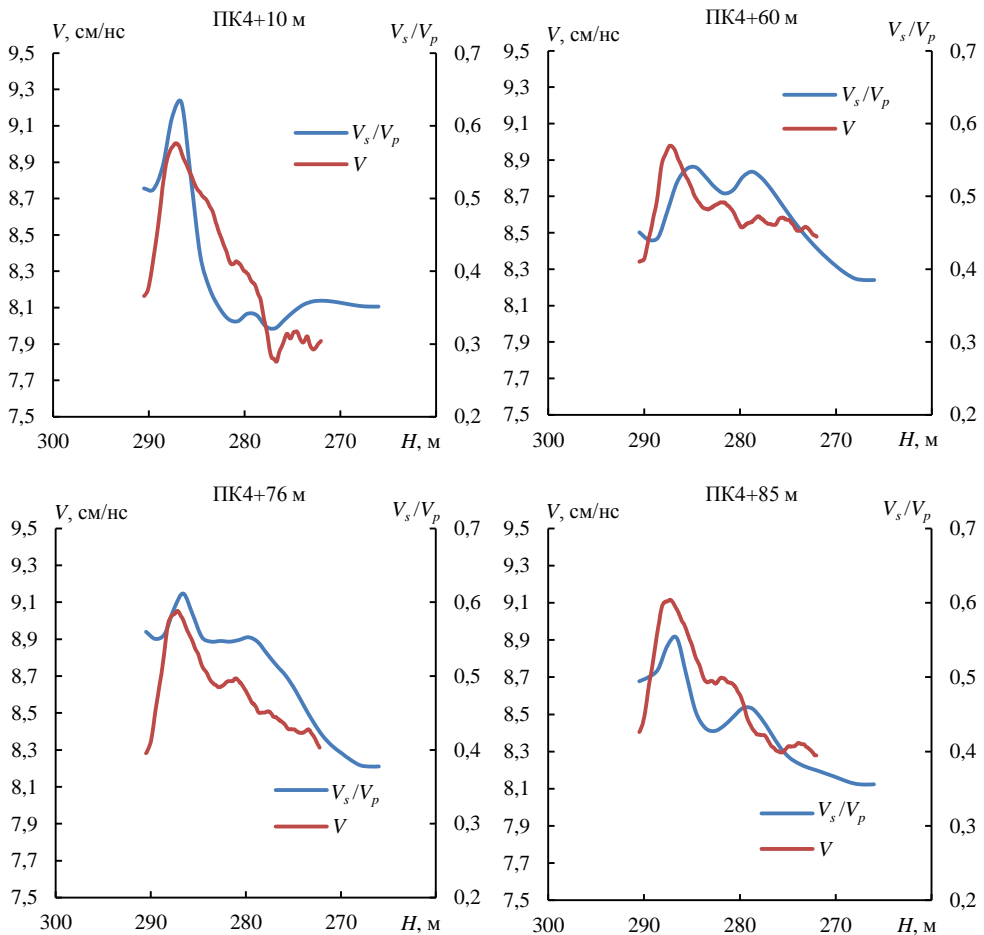


Рис. 3. Сопоставление результатов наблюдений георадарным (электромагнитным) ( $V$ ) и сейсмическим ( $V_s/V_p$ ) зондированием по трассам в сечениях дамбы

Распространение сейсмической волны в геологической среде представляет собой поле смещений частиц среды. В идеально упругой однородной изотопной среде оно описывается уравнением динамического равновесия Ламе [8]:

$$\frac{\lambda + 2G}{\rho} \text{grad div } \dot{u} + \frac{G}{\rho} \text{rot rot } \dot{u} = \frac{d^2 \dot{u}}{dt^2}, \quad (1)$$

где  $u = u(x, y, z, t)$  – вектор смещения частиц среды под действием проходящей волны во времени  $t$  и в пространстве  $x, y, z$ ;  $\rho$  – плотность среды;  $\lambda, G$  – упругие модули.

Через плотность среды  $\rho$  и коэффициенты Ламе  $\lambda$  и  $G$  в формуле (1) представлены скорости продольных  $V_p$  и поперечных волн  $V_s$  в среде [8]:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}; \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

В сейсморазведке в качестве показателя для идентификации водонасыщенных зон в грунтах используется соотношение скоростей  $V_s/V_p$ , функционально определяющее коэффициент Пуассона среды  $\mu$  согласно выражению:

$$\mu = \frac{0,5 - (V_s / V_p)^2}{1 - (V_s / V_p)^2}.$$

На основе многочисленных натуральных и лабораторных определений, выполненных для различных грунтов [9] плотин и дамб Кольского полуострова в увлажненном состоянии, величины соотношений  $V_s/V_p$  могут варьировать в пределах 0,31–0,37.

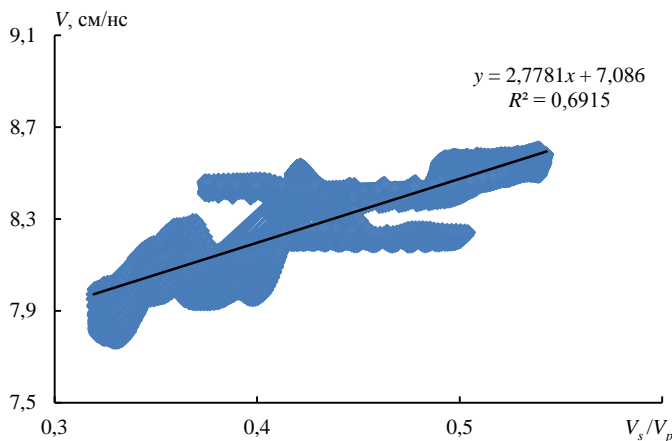


Рис. 4. Зависимость скорости электромагнитной волны  $V$  от отношения скоростей упругих волн  $V_s/V_p$  на интервале глубин 276–278 м

В данной работе была поставлена цель провести синхронное зондирование ограждающей дамбы хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» георадарным (электромагнитным) и сейсмическим методами (рис.1). Основные результаты выполненных синхронных исследований представлены на рис. 2 в виде радарограммы скорости электромагнитной волны  $V$  и сейсмотограммы соотношения сейсмических скоростей  $V_s/V_p$ . Исходя из палитры выделенных по указанным критериям зон визуально отмечается подобие в распределениях исследуемых разрезов, что отражает структурные особенности обследуемого участка. Для более точного сопоставления результатов на рис. 3 представлены графики изменения контролируемых показателей по трассам зондирования в отдельных разрезах на четырех пикетах.

Интерпретация анализируемых результатов позволяет сделать следующие выводы. Приповерхностная зона до 289,5–289,0 м (1,0–1,5м), подверженная проникновению осадков, характеризуется начальной невысокой скоростью

$V = 8,10\text{--}8,22$  см/нс, с дальнейшим резким ее нарастанием до  $V = 8,36\text{--}8,71$  см/нс на глубине 282,5–280,0 м (8–10 м), что скорее всего обусловлено ростом плотности и снижением влажности грунтов. В интервале высотных отметок 280–270 м фиксируется зона резкого падения величин скоростей до значений  $V = 7,35\text{--}7,71$  см/нс. Глядя на подобные изменения показателя  $V_s/V_p$  на этих же отметках, составляющего 0,30–0,35 по сейсмотомограмме (рис. 2, б – голубой цвет), можно заключить, что грунты здесь подвержены значительному намоканию.

**Категорирование грунтов по водонасыщению на основе натуральных георадарных (электромагнитных) и сейсмических наблюдений**

Показатель	I	II	III
По данным электромагнитного зондирования, $V$	Менее 8,05	8,06–8,66	Более 8,67
По данным сейсмики, $V_s/V_p$	0,30–0,35	0,36–0,50	0,51–0,60

Сравнение данных георадарного и сейсмического зондирования показало наличие уверенной корреляции (сходимости) полученных результатов. Корреляционная взаимосвязь двух массивов данных  $V$  и  $V_s/V_p$  выполнялась с шагом  $x = 0,25$  м;  $y = 0,1$  м, где на каждый интервал глубин приходится 7700 точек сравнения. Коэффициент корреляции варьирует от 0,56 до 0,68 в интервале высотных отметок 290,5–280,0 м и от 0,68 до 0,83 в интервале 280–272 м, что соответствует средней и сильной связи данных по общей классификации коэффициента корреляции [10].

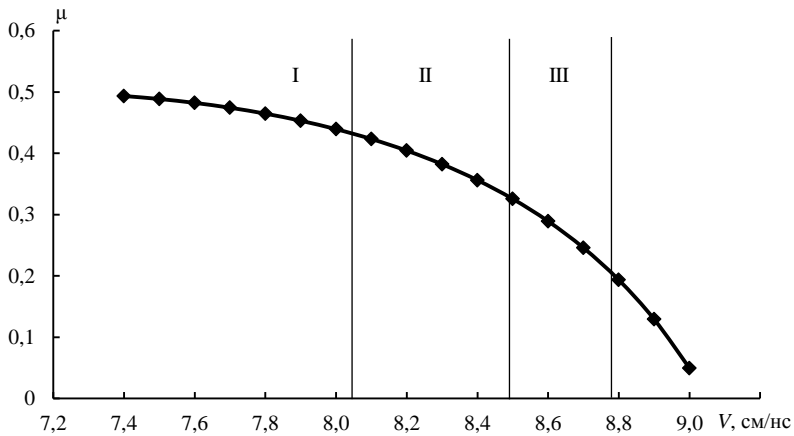


Рис. 5. Диаграмма категорирования водонасыщенности грунтов по скорости электромагнитной волны:

I – водонасыщенные грунты; II – грунты плотные увлажненные; III – грунты плотные естественной влажности

На интервале отметок 276–278 м выявлена наибольшая корреляционная взаимосвязь данных с коэффициентом 0,83. По данным облака точек построен график эмпирической зависимости скорости электромагнитной волны  $V$  от соотношения скоростей упругой волны  $V_s/V_p$  (рис. 4). Установлена взаимосвязь полученных данных с величиной достоверности аппроксимации 0,6915:

$$V = 2,7781 \frac{V_s}{V_p} + 7,086.$$

Полученные результаты также позволили установить корреляционные связи скоростей электромагнитных волн  $V$  с такой важной характеристикой грунтов, как коэффициент Пуассона. Вид этой взаимосвязи отражен в выражении:

$$\mu = \frac{0,5 - (0,3599V - 2,5506)^2}{1 - (0,3599V - 2,5506)^2}.$$

Выполненные исследования синхронного георадарного (электромагнитного) и сейсмического мониторинга предоставляют основу для категорирования грунтов по их свойствам и водонасыщенности в разрезах дамбы согласно приведенной таблице.

На основании полученных результатов георадарных измерений, с использованием аналогий представления результатов по сейсмическим данным была построена диаграмма категорирования водонасыщенности грунтов по результатам георадарного зондирования (рис. 5).

Выполненный сопоставительный анализ проведенных синхронных георадарных (электромагнитных) и сейсмических исследований позволил более надежно установить границы зон и интервалы скоростей электромагнитной волны при переходе из сухих плотных грунтов в увлажненные и далее в водонасыщенные по данным отношения скоростей продольной и поперечной упругой волны. При этом установлена взаимосвязь коэффициента Пуассона исследуемых грунтов со скоростью электромагнитной волны посредством выявленной эмпирической зависимости скорости электромагнитной волны  $V$  от соотношения скоростей упругой волны  $V_s/V_p$ . Выполнено категорирование грунтов по их свойствам и водонасыщенности в разрезах дамбы в зависимости от скорости электромагнитной волны. Полученные результаты предоставляют основу для интерпретации данных георадарного зондирования при решении задач идентификации и локализации водонасыщенных участков в теле грунтовых сооружений с большей надежностью и технологичностью.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20. № 1(1). С. 13–20.
2. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю., Максимов Д. А. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1. С. 39–49.
3. Абрамов Н. Н., Снежкова Е. Е. Сейсмотомографическое изучение внутренней структуры дамбы хвостохранилища ОАО «Апатит» // Горный журнал. 2007. № 12. С. 39–42.
4. Данилкин А. А., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Максимов Д. А. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа // ГИАБ. 2014. № 7. С. 344–351.
5. Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А. Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 2. С. 13–16.
6. Калашник А. И., Дьяков А. Ю. Информационные технологии в задачах мониторинга гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий подповерхностным георадиолокационным зондированием // ГИАБ. 2017. № S23. С. 283–291.
7. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 192 с.
8. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
9. Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А., Кабеев Е. В. Геомеханическое сопровождение технологии строительства и эксплуатации гидротехнических грунтовых сооружений // Гидротехническое строительство. 2014. № 5. С. 11–15.
10. Рыжов П. А. Математическая статистика в горном деле: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1973. 287 с.

## COMBINATION OF GEORADAR AND SEISMIC SOUNDING OF TAILINGSSTORAGE DUM

Kalashnik A. I., D'iakov A. Iu., Abramov N. N. – Mining Institute KSC RAS, Apatites, the Russian Federation.  
E-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

The paper considers some approaches to the combination of modern nondestructive geophysical investigations on the subcontour sounding of bulk soil structures of mining type for the examination of their subsurface structure and localization of zones of various ground water saturation in their bodies. A range of full-scale experiments has been fulfilled on synchronous in space and time sounding of bund wall of the tailingsstorage at AO Kovdorsky GOK with various wave methods: electromagnetic (with the use of georadar technologies) and seismic. The acquired results are presented in the form of radargram of electromagnetic wave velocity, seismic tomogram of the correlation of elastic velocities and their graphs of behavior over the most unique sections. Comparative analysis has been fulfilled of the palettes of radargrams and seismic tomograms, as well as quantitative values according to wave traces, which made it possible to more exactly determine the borders of grounds water saturation zones according to georadar data. Electromagnetic wave velocity ranges are singled out at the transition from dry, hard grounds into moistened and further into water saturated grounds, based on the relation of velocities of longitudinal and rotational elastic waves of seismic sounding. Statistic analysis of the obtained electromagnetic and seismic data is fulfilled, based on which the velocity values correlation coefficients are calculated, and also correlation relationship of electromagnetic waves velocity of transmission in grounds with their Poisson ratio. Thus the possibility of grounds Poisson ratio determination has been substantiated by their georadar sounding data. Grounds' rating has been fulfilled according to their properties and water saturation in the open pits of a dam depending on electromagnetic wave velocity. The acquired data represent the foundation for the interpretation of georadar sounding data when solving the tasks of identification and localization of water saturated sections in a body of soil structures with greater reliability and manufacturability.

**Key words:** dam; tailingsstorage; georadar sounding; seismic sounding; grounds water saturation.

### REFERENCES

1. Mel'nikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. [Application of modern methods for integrated investigations of the state of hydroengineering structures of the region of the Barents sea]. *Vestnik MSTU – Proceedings of the Murmansk State Technical University*, 2017, vol. 20, no. 1(1), pp. 13–20. (In Russ.)
2. Mel'nikov N. N., Kalashnik A. I., Zaporozhets D. V., D'iakov A. Iu., Maksimov D. A. [Experience of applying georadar subsurface investigations in the western part of the Russian sector of Arctic]. *Problemy Arktiki i Antarktiki – Problems of Arctic and Antarctic*, 2016, no. 1, pp. 39–49. (In Russ.)
3. Abramov N. N., Snezhkova E. E. [Seismo-tomographic research of the inner structure of OAO Apatite tailingsstorage dam]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2007, no. 12, pp. 39–42. (In Russ.)
4. Danilkin A. A., Kalashnik A. I., Zaporozhets D. V., Maksimov D. A. [Monitoring of the state of bund wall in the zone of mining Kovdorsky GOK technogenic deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. 7, pp. 344–351. (In Russ.)
5. Kalashnik A. I., Zaporozhets D. V., Kalashnik N. A. [Identification of filtration-deformation processes in the body of bund wall of a tailingsstorage]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN – Herald of the Kola Science Centre RAS*, 2013, no. 2, pp. 13–16. (In Russ.)
6. Kalashnik A. I., D'iakov A. Iu. [Information technologies in the tasks of hydroengineering structures of mining enterprises monitoring with subsurface ground penetrating radar sounding]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. S23, pp. 283–291. (In Russ.)
7. Starovoitov A. V. *Interpretatsiia georadiolokatsionnykh dannykh* [Ground penetrating radar data interpretation]. Moscow, MMU Publ., 2008. 192 p.
8. Boganiuk G. N., Gurvich I. I. *Seismorazvedka* [Seismic survey]. Tver, AIS Publ., 2006. 744 p.
9. Abramov N. N., Epimakhov Iu. A., Kabeev E. V. [Geomechanical support of the technology of building and exploitation of hydroengineering soil structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Water Engineering*, 2014, no. 5, pp. 11–15. (In Russ.)
10. Ryzhov P. A. *Matematicheskaya statistika v gornom dele: ucheb. posobie* [School book “Mathematical statistics in mining”]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1973. 287 p.