

## СПЕЦИФИКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИЗНАКОВ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОМ ВЫЯВЛЕНИИ ПОЛОСТЕЙ В МАССИВЕ ПОРОД НА ГРАНИЦЕ «ОБДЕЛКА–ГРУНТ»

В.В. Набатов<sup>1</sup>, А.В. Уткина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: nv4@mail.ru

**Аннотация:** Рассмотрена проблема поиска полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов с помощью признаков, вычисляемых по результатам обработки георадиолокационных трасс. Результаты георадиолокационных и сейсмоакустических съемок в тоннелях московского метрополитена позволили выявить такие особенности, как высокая изменчивость способности признаков выделять аномалию, а также множественные случаи «ложного срабатывания». Поскольку изменчивость проявлялась при переходе от одного объекта к другому, но в рамках одного объекта выражена слабо, предполагается настройка системы выявления полостей на отдельных эталонах (подтвержденных другими методами) и последующее ее использование на всем остальном объекте. Количество случаев «ложного срабатывания» и «пропуска цели» предполагается минимизировать путем использования комплексов признаков. Подобная система может работать в рекомендательном режиме, сокращая количество ошибок интерператора при работе на больших объемах данных. Предложен ряд оценок, по которым можно отбирать признаки в комплексы. Предложены оценки интенсивности выделяемой признаком аномалии; надежности разделения ситуаций «есть полость» и «нет полости» с помощью параметров ROC-кривых; независимости признаков с помощью линейных коэффициентов корреляции. Проанализировано поведение этих признаков на натурных данных. Установлено, что модули коэффициента корреляции между признаками для участков радарограмм с наличием полости  $|RP|$  и без нее  $|RN|$  образуют хорошо разделяющиеся кластеры, что позволяет принимать решение о независимости признаков. Поскольку параметры этих кластеров стабильны от объекта к объекту, при составлении комплексов признаков можно использовать уравнение дискриминантной линии.

**Ключевые слова:** обделка, тоннель, полость, георадиолокация, помехи, признаки, комплексирование, критерии отбора.

**Для цитирования:** Набатов В. В., Уткина А. В. Специфика изменчивости признаков зарегистрированных сигналов при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе «обделка–грунт» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 52–63. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_7\_0\_52.

---

## Specific variability of features of recorded signals in georadar detection of voids at rock–lining interface

V.V. Nabatov<sup>1</sup>, A.V. Utkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,  
e-mail: nv4@mail.ru

---

**Abstract:** Spotlight is on detection of voids at the rock–lining interface in metro tunnels by features identified in processing of georadar profiles. The georadar and seismic surveys in the Moscow metro tunnels revealed high variance in the ability of features to point at an anomaly, and disclosed numerous cases of false triggering. The variability arose in transition between test subjects but was weak within the limits of the same subject. For this reason, it is proposed to set a void detection system with respect to some references (confirmed using other methods) and to use this system further for the whole test subject. The number of the false triggering and missed target events is suggested to minimize by using sets of features. Such system may operate in an advisory mode to reduce interpreter's errors when processing bulks of data. A series of estimates is proposed to select features to be integrated in a check set. The article offers estimation of intensity of an anomaly distinguished by selected features; reliability of distinguishing between the void and no void situations using parameters of ROC-curves; independence of features using linear correlation factors. Behavior of the features is analyzed using in-situ data. It is found that the moduli of correlation factors of the features in the radarogram areas with and without a void,  $|RP|$  and  $|RN|$ , respectively, form well-splitting clusters, which enables decision-making on independence of the features. Parameters of the clusters are stable between the test subjects, and, therefore, it is possible to use the discriminant curve equation to integrate features in a set.

**Key words:** lining, tunnel, void, georadar detection, noise, features, complexing, selection criteria.

**For citation:** Nabatov V. V., Utkina A. V. Specific variability of features of recorded signals in georadar detection of voids at rock–lining interface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(7):52–63. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_7\_0\_52.

---

### Введение

Одной из серьезных проблем строительства и эксплуатации тоннелей метрополитенов является образование полостей на границе «грунт–обделка».

Подобные полости могут приводить к деформациям и растрескиванию обделки, концентрации напряжений на локальных участках [1–4], влиять на окружающую застройку. Эту проблему решают путем поиска полостей неразрушающими методами контроля с целью последующего тампонажа.

Наиболее часто для поиска полостей используются сейсмоакустические исследования (методы Impact Echo и Impulse Response (IR) [5–7]), а также георадиолокация [3, 8, 9]. Недостатком сейсмоакустических исследований является точность обследования – типичное расстояние между соседними сечениями тоннеля составляет 3–5 м. Этому недостатку лишена георадиолокация, однако ее проблемами являются трудоемкость и субъективность интерпретации. Контроль заобделочного пространства тон-

нелей часто требует съемки длинных, километровых участков, которые нужно обследовать несколькими профилями. Трудоемкость интерпретации в этом случае становится серьезной проблемой — при большом объеме легко допустить ошибки типа «пропуск цели» или «ложное срабатывание». Причиной этого является воздействие на радиоизображение помех, влияние субъективного фактора при принятии решения интерпретатором, сложности с разделением аномальных и фоновых значений параметров георадиолокационного сигнала [10].

Решением здесь может быть разработка методик, использующих как отдельные признаки, вычисляемые по результатам обработки георадиолокационных трасс, так и их комплексы — подобные подходы активно используются в практике контроля [8, 11 — 13]. Суть подхода состоит в выделении с помощью различных методов обработки георадиолокационных трасс характеристик (динамических, статистических и пр.), способных указывать на ситуацию «полость за обделкой». Подобная система может работать как рекомендательный механизм, указывающий интерпретатору на участки, которым нужно уделить дополнительное внимание, а также как источник дополнительной информации о зарегистрированном волновом поле.

Для разработки таких методик необходимо выработать ряд критериев, на основании которых можно было бы принимать решение о том, являются ли те или иные признаки информативными (т.е. способными выделять аномалию). А также о том, могут ли они составлять так называемую информативную совокупность признаков (ИСП) [14], т.е. такую совокупность, при использовании которой достоверность выявления полости является максимальной.

Выработке таких критериев и анализу поведения тех или иных признаков

по результатам съемок в тоннелях московского метрополитена и посвящена эта статья.

### **Методы полевой работы**

Полевой материал для исследования был собран в тоннелях московского метрополитена. Георадиолокационное профилирование производилось с помощью георадара «ОКО-2» с антенными блоками с центральной частотой 1200 и 1700 МГц. Случаи наличия и отсутствия полостей выявлялись с помощью сейсмоакустического обследования методом IR в соответствии с методикой, описанной в [6]. Далее по тексту статьи под объектом понимается отрезок тоннеля с однотипной обделкой, находившейся в одинаковых эксплуатационных условиях (длительность, условия эксплуатации). В рамках объекта могли выделяться различные участки.

### **Методы работы с признаками**

На начальной стадии исследования был определен предварительный набор признаков, способных указывать на наличие полости за обделкой. Основанием для включения в этот набор был либо обзор литературных источников [8, 15 — 17], либо предварительный анализ результатов георадиолокационной съемки на строящихся и эксплуатируемых объектах московского метрополитена, описанный в [18]. Признаки должны подчеркивать такие особенности радарограмм, как «звон», хаотическая волновая картина, изменение энергии сигнала на локальных участках трасс и пр. Признаки, связанные с изменением коэффициента отражения на границе «грунт–обделка», не рассматривались, поскольку эта граница обычно испытывает существенное помеховое воздействие от армирования и при обследовании обделок анализ коэффициента отражения работает плохо [19].

Выбранные признаки можно разделить на три группы.

1. Спектральные признаки (указывающие на изменения параметров спектрального максимума, который обычно представлен одним выраженным пиком), в качестве которых анализировались добротность  $Q$  (часто также называемая  $Q$ -фактором); обратная ширина спектрального пика  $\Delta f^{-1}$ ; частота спектрального максимума  $f_{\max}$ ; эффективная ширина спектра  $F_s$ . Как было показано в [18], основной вклад в поведение  $Q$  при измерениях на обделках делает  $\Delta f^{-1}$ , а  $f_{\max}$  в основном хаотично реагирует на наличие полости.

Для признаков этой группы исключалась предварительная обработка трасс (выравнивание, обрезка, сглаживание), поскольку это существенно искажало спектр. Также специфика поведения спектра часто требовала оценивать ширину спектрального пика на уровне, отличном от 0,707 амплитуды спектрального максимума [18].

2. Динамические признаки (указывающие на изменение энергии сигнала, возникающее на локальных участках трасс за счет «звона» либо отражения от неоднородностей), в качестве которых анализировались сумма значений амплитуд огибающей  $H_s$  (огибающая получена с помощью преобразования Гильберта) и энергия сигнала  $E_s$ . Для этих признаков требовались выравнивание амплитуд (методика этого выравнивания описана в [20]) и обрезка трассы (отсечение зашумленной части трассы, которая после выравнивания оказывает на признак слишком существенное воздействие).

3. Статистические признаки (указывающие на изменения в форме законов распределения амплитуд георадиолокационных трасс), в качестве которых анализировались эксцесс  $\gamma$ ; среднеквадратическое отклонение (с.к.о.)  $\sigma$ ; размах между разрядами гистограммы  $\Delta A$ . Та-

кие особенности сигнала, как «звон» и хаотическая волновая картина, приводили к тому, что в распределении появлялись так называемые «тяжелые хвосты». Для этих признаков также требовались выравнивание амплитуд и обрезка трассы. Для  $\Delta A$  было важно подобрать номера разрядов, между которыми вычислялся размах (крайние разряды могут вести себя случайно), а также их количество.

Использовался также такой признак, как протяженность корреляционных связей  $\tau$ , подчеркивавший регулярные структуры, образуемые «звоном». Эта характеристика не являлась аналогом  $F_s$ , поскольку считалась по измененной (выровненной и обрезанной) трассе. Функция изменения  $\tau$  вдоль профиля требовала процедуры сглаживания скользящим окном.

Следующим этапом исследований было определение ряда критериев, с помощью которых можно было решить, являются ли те или иные признаки информативными (т.е. способными выделять аномалию).

1. Интенсивность аномалии. Этот критерий описывает различие между средними значениями признаков в области аномалии и в области фона. Простейшей оценкой этого критерия может быть

$$\mu = \frac{\bar{A}_A - \bar{A}_\Phi}{\sigma_n},$$

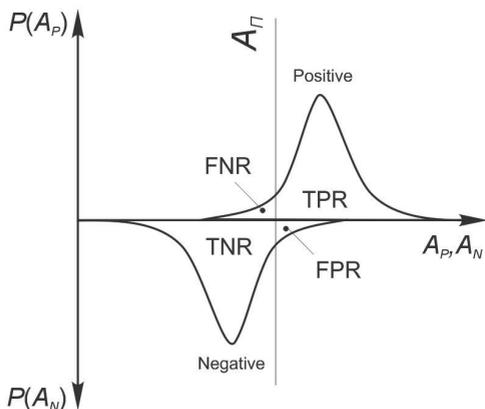
где  $\bar{A}_A$  — среднее значение признака в области аномалии;  $\bar{A}_\Phi$  — среднее значение признака вне аномалии (фоновое);  $\sigma_n$  — с.к.о. признака для всего объема измерений. При  $\mu > 3$  аномалия считается достоверной, при  $1 < \mu < 3$  аномалию считают слабой, при  $\mu < 1$  признак рекомендуется исключать из ИСП.

С.к.о. признака будет рассчитываться только для внеаномальных значений признака, так как критерий достоверности аномалии  $\mu > 3$  фактически является применением «правила  $3\sigma$ ».

Критерий интенсивности аномалии можно использовать и как способ отбора признака при формировании ИСП, и как сравнительную характеристику информативности признака или комплекса признаков.

2. Независимость признаков. Довольно часто возникает ситуация, когда некоторые из признаков оказываются связанными, что приводит к тому, что они однотипно реагируют на помеховые факторы. Оценкой этого критерия могут выступать значения модулей коэффициентов линейной корреляции  $|R|$ .

Контроль независимости признаков велся с помощью корреляционных матриц и диаграмм рассеяния, для построения которых вычислялись модули коэффициентов парной корреляции  $|R|$ . Определение порогового значения  $|R|$ , выше которого в комплексе можно было оставлять только один признак из коррелирующей пары, будет рассмотрено в результатах исследований.



$A_p$  — значения исследуемого признака при съемке на эталоне Positive

$A_n$  — значения исследуемого признака при съемке на эталоне Negative

Рис. 1. Иллюстрации понятий TPR, TNR, FPR и FNR при верном и ошибочном распознавании ситуации «полость за обделкой»

Fig. 1. Illustrations of the concepts of TPR, TNR, FPR and FNR for correct and incorrect void-behind-liner recognition

3. Надежность разделения. Одной из проблем принятия решения о наличии полости за обделкой является тот факт, что даже признак с высокой интенсивностью на отрезке профиля, соответствующего ситуации «полость за обделкой», может давать близкие к фоновым значения (реализуется ситуация так называемого «пропуска цели»). Также существуют ситуации, когда значение признака указывает на наличие полости в той части профиля, где полость отсутствует («ложное срабатывание»). В процессе полевых исследований эти ситуации наблюдались даже при использовании одного из самых информативных и стабильно работающих признаков —  $H_s$ . Таким образом, возникает задача выбора оценки этого критерия, с помощью которой можно будет отсеивать признаки с низкой надежностью разделения.

Описанные ниже оценки надежности разделения опираются на вероятности верного или ошибочного распознавания ситуации Positive («цель», т.е. «есть полость за обделкой») и Negative («отсутствие цели», т.е. «нет полости за обделкой»), получаемые на эталонных участках:

$P_{TP}$  — вероятность верно обнаружить полость (принято обозначать как True Positive Rate, или TPR), эта характеристика также носит название чувствительности метода распознавания;

$P_{TN}$  — вероятность верно обнаружить отсутствие полости (True Negative Rate, или TNR), эта характеристика также носит название специфичности метода распознавания;

$P_{FP}$  — вероятность ошибочно обнаружить полость (False Positive Rate, или FPR), так называемое «ложное срабатывание»;

$P_{FN}$  — вероятность ошибочно пропустить полость (False Negative Rate, или FNR), так называемый «пропуск цели».

На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая эти понятия. Даны два рас-

пределения (для эталонов Positive и Negative), а также одно из пороговых значений признака  $A_{п}$ , которое работает как классифицирующее правило:

$$A > A_{п} = > \text{Positive},$$

$$A < A_{п} = > \text{Negative}.$$

Указаны вероятности TPR, TNR, FPR, FNR.

Часто используют такие характеристики, как TPR и TNR. Основная проблема при работе с ними состоит в том, что они не дают совместной оценки поведения классификатора — непонятно, как выбирать классификатор в условиях, например, высокого TPR и очень низкого TNR (классификатор легко находит полости, но часто показывает их там, где их нет).

Этой проблемы лишен такой инструмент, как ROC-кривые. Пример ROC-кривой представлен на рис. 2. Подобная кривая строится в координатах TPR от FPR с помощью перебора всех значений порога  $A_{п}$  (каждая точка кривой — это одно из положений порога). В случае, если ROC-кривая представляет собой прямую (обозначена «а» на рис. 2), считается, что классификатор реализует случайное угадывание. Нетрудно заметить, что на этой прямой  $TPR = FPR$ , то есть вероятность правильно распознать Positive-случай равна вероятности ошибочно принять Negative-случай за Positive. В случае ROC-кривой, обозначенной на рис. 2 буквой «б», будет наблюдаться ситуация  $TPR > FPR$ . А ROC-кривая, обозначенная на рис. 2 буквой «в», реализует то, что называется идеальным классификатором. Чем ближе линия «б» к линии «в», тем лучше классификатор.

Достоинствами ROC-кривой являются: слабая зависимость от несбалансированности выборок Positive и Negative; возможность выбирать оптимальный порог; независимость от выбора порога  $A_{п}$  при оценке надежности признака.

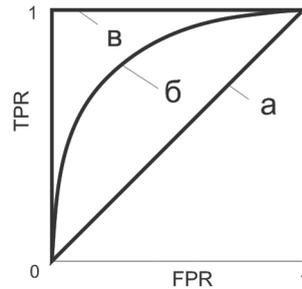


Рис. 2. Примеры ROC-кривых: случайное угадывание (а); типичная ROC-кривая (б); идеальный классификатор (в)

Fig. 2. Examples of ROC curves: random guessing (a); typical ROC curve (b); ideal classifier (v)

Для сравнения надежности разделения по тем или иным признакам необходима численная оценка. Для этого принято использовать оценку AUCROC, представляющую собой площадь под ROC-кривой. Диапазон значений AUCROC располагается от 0,5 (случайное угадывание) до 1 (идеальный классификатор). Такая шкала не очень удобна, поэтому распространение получила такая характеристика, как коэффициент Джини:

$$G = 2 \cdot \text{AUCROC} - 1.$$

В этом случае значения  $G$  изменяются от 0 (случайное угадывание) до 1 (идеальный классификатор). Для оценки надежности разделения случаев «полость» и «нет полости» в этом исследовании использовался именно коэффициент  $G$ .

### Результаты исследований

По факту проведенных натуральных исследований был выявлен ряд особенностей поведения признаков и их оценок.

1. В первую очередь стоит отметить специфику поведения оценки  $|R|$ , позволившую выработать критерии отбора признаков для ИСП. Для ряда участков георадиолокационного обследования было произведено измерение методом IR, позволившее оценить факт наличия либо отсутствия полости за обделкой. Пос-

ле этого были получены выборки значений различных признаков для случаев Positive и Negative, а также вычислены значения модулей коэффициентов корреляции  $|R_p|$  и  $|R_N|$  для этих участков соответственно. Весь объем полученных подобным образом коэффициентов корреляции наносился на диаграмму рассеяния « $|R_p| - |R_N|$ ».

В процессе опробования оказалось, что на таких диаграммах практически всегда можно было наблюдать два хорошо разделяемых кластера, которые интерпретировались как кластер высоких значений и кластер низких значений. Это различие можно использовать для поиска высококоррелирующих пар.

На рис. 3 представлена диаграмма рассеяния « $|R_p| - |R_N|$ », в которой собраны значения  $|R|$  с трех различных объектов (различаются типы обделок и времена эксплуатации), отображенных разными маркерами. Заметно, что кластеры оказываются хорошо разделяемыми независимо от объектов.

Стоит отметить, что кластеры на рис. 3 нельзя разделить без ошибок по одно-

мерному пороговому правилу (множества по  $|R_p|$  перекрываются, а по  $|R_N|$  остается очень небольшой диапазон значений для порога). Поэтому двумерный порог (дискриминантная линия) является наилучшим решением. Для полученного набора данных дискриминантная линия может быть описана уравнением  $|R_p| = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$ . Эта линия подбиралась по средневзвешенной координате центроидов кластеров из условия, что она должна быть перпендикулярна линии, проходящей через эти центроиды, и приближена к тому кластеру, у которого дисперсия ниже. Были получены следующие значения коэффициентов:  $\alpha_0 = 1,47$ ,  $\alpha_1 = -1,01$ .

Стабильность положения дискриминантной линии можно подтвердить через стабильность координат центроидов (это средние по координатам) и стабильность значений дисперсии. Для этого использовались  $t$ -критерий Стьюдента и  $F$ -критерий Фишера. Сравнение средних, а также дисперсий производилось между выборками каждого из объектов и обобщенной выборкой (все три объек-

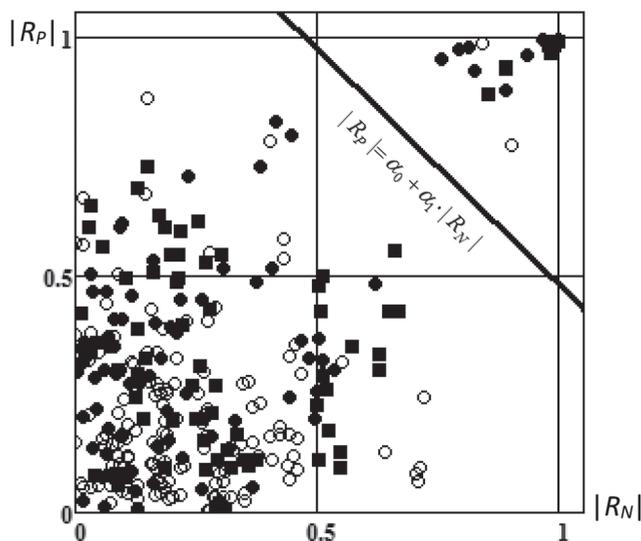


Рис. 3. Диаграмма рассеяния « $|R_p| - |R_N|$ » с нанесенной дискриминантной линией  
Fig. 3. Diagram « $|R_p| - |R_N|$ » with applied discriminant line

та вместе). Во всех случаях не было основания принять гипотезу о неравенстве.

Анализ результатов вычислений  $|R|$  показал, что в некоторых случаях обладают высокой корреляцией не только пары, а и группы по три или четыре признака. В подобных случаях в ИСП стоит отбирать только какой-то один признак из группы, опираясь на дополнительные критерии, например, на значения  $\mu$ .

Несмотря на то, что положение кластеров и дискриминантной линии довольно стабильное, не всегда в эти кластеры попадали одни и те же признаки. Так, например, в одном случае обладают высокой корреляцией элементы группы  $\gamma$ ,  $\sigma$ ,  $H_s$  и  $E_s$ , в то время как в другом случае эксцесс может выпадать из этой группы. Это можно объяснить и тем, что эксцесс перестает реагировать на аномалию, и тем, что он перестает реагировать на помехи.

Полученная дискриминантная линия может быть использована в качестве оценки разделения зависимых и независимых признаков:

$|R_p| > \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$  — признаки зависимы;

$|R_p| < \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$  — признаки независимы, где  $\alpha_0 = 1,47$ ,  $\alpha_1 = -1,01$ .

2. Поведение самих признаков также имеет некоторые особенности. По результатам обработки полученных в тоннелях данных стало ясно, что в рамках одного объекта информативность признака обычно сохраняется, слабо варьируя от полости к полости. Однако при переходе на другой объект можно наблюдать существенное изменение информативности признака.

Этот вывод иллюстрирует таблица, в которой представлены значения оценок  $G$  и  $\mu$  для различных объектов и участков обследования. Участки обозначены кодом — например, «01 У1» означает объект № 1, участок № 1.

Можно заметить, что если для объекта № 1 высокой надежностью разделения  $G$  обладают признаки  $\Delta A$ ,  $H_s$  и  $\Delta f^1$ , то для объекта № 2 предпочтительными оказываются  $H_s$  и  $\tau$ . При этом  $\Delta f^1$  теряет надежность. Для объекта № 3 надежные признаки — это  $\Delta f^1$  и  $H_s$ , а не-

**Оценки надежности разделения  $G$  и интенсивности аномалии  $\mu$  по ряду признаков для различных объектов и участков обследования**  
**Estimates of the reliability of separation and intensity of anomaly on a number of features for different works and survey sites**

Признак	Коды объектов и участков			
	01 У1	01 У2	02 У1	03 У1
<b>G</b>				
$\Delta f^1$	0,83	0,63	0,37	0,92
$\Delta A$	0,96	0,76	0,47	0,025
$H_s$	0,98	0,83	0,64	1
$\tau$	0,32	0,28	0,64	0,071
<b><math>\mu</math></b>				
$\Delta f^1$	3,9	2,8	0,58	6,1
$\Delta A$	7,5	5,9	1,63	0,07
$H_s$	6,7	3,9	2,3	10,7
$\tau$	0,5	0,4	2,8	0,056

надежные —  $\Delta A$  и  $\tau$ . Стоит отметить, что одни и те же признаки остаются наиболее надежными для различных участков одного и того же объекта (см. столбцы «O1 Y1» и «O1 Y2»), но смена объекта сильно меняет значения  $G$ .

Для «O1 Y1»  $\Delta A$  и  $H_5$  являются идеальными классификаторами ( $G \approx 1$ ), и распознавание можно было бы производить по одному из этих признаков. А на участке «O1 Y2» надежность разделения этих признаков снижается, что требует применения комплекса признаков.

Анализируя значения  $\mu$ , можно отметить, что ситуация здесь аналогична — на объекте № 1 одни и те же признаки сохраняют высокую интенсивность, но ситуация смены объекта меняет и список информативных признаков.

Причинами подобной изменчивости оценок информативности признаков от объекта к объекту могут являться особенности массива пород за обделкой, изменение толщины обделки, изменение ее конструктивных особенностей, влияние особенностей эксплуатации. Причинами высоких уровней ошибок типа «пропуск цели» или «ложное срабатывание» можно назвать специфику объекта. Типичные толщины обделок (25–30 см) таковы, что на полезный сигнал оказывает сильное воздействие прямая волна, радиообразы прутков армирования, затухание сигнала, а потому влияние полости на определяемые признаки становится не столь выраженным.

## Выводы

Анализ поведения признаков, вычисляемых при обработке георадиолокационных трасс, позволил сделать следующие выводы.

1. Информативность, т.е. способность выделять аномалию, различных признаков может испытывать существенную вариацию от объекта к объекту, при сохранении информативности конкретно-

го признака в рамках одного объекта. Следовательно, система распознавания «полость за обделкой» требует настройки на эталоне с последующим использованием настроенной системы на всем объекте.

2. Выбор участков-эталонных для ситуации «есть полость» и «нет полости» можно производить по результатам съемки другим методом, в частности, сейсмоакустическим методом IR. Георадиолокация в этом случае позволит выявлять полости между точками IR.

3. Значения признаков в границах аномалии и за ее пределами могут испытывать существенные вариации, что приводит к частым ситуациям «ложное срабатывание» и «пропуск цели» даже в случае использования признаков, которые обладают наибольшей информативностью. Выходом из этой ситуации может стать применение комплексов признаков.

4. Модули коэффициента корреляции между признаками для участков радарограмм с наличием полости  $|RP|$  и без нее  $|R_N|$  образуют хорошо разделяющиеся кластеры, что позволяет принимать решение о независимости тех или иных признаков. Поскольку параметры этих кластеров стабильны от объекта к объекту, при составлении комплексов признаков можно использовать следующую оценку:

$|R_p| > \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$  — признаки зависимы;

$|R_p| < \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$  — признаки независимы, где коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  определены выше.

5. Некоторые из признаков склонны образовывать группы с высокой попарной корреляцией. В таком случае в комплексе желательно использовать только один признак из группы.

Авторы выражают благодарность П.В. Николенко и Р.М. Гайсину за помощь в проведении полевых измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jia-Xuan Zhang, Ning Zhang, Annan Zhou, Shui-Long Shen* Numerical evaluation of segmental tunnel lining with voids in outside backfill // *Underground Space*. 2022, vol. 7, no. 5, pp. 786 – 797. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.12.007.
2. *Chengping Zhang, Bo Min, Haili Wang, Sulei Zhang* Mechanical properties of the tunnel structures with cracks around voids behind linings // *Thin-Walled Structures*. 2022, vol. 181, article 110117. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110117.
3. *Dingli Zhang, Tong Xu, Huangcheng Fang, Qian Fang, Liqiang Cao, Ming Wen* Analytical modeling of complex contact behavior between rock mass and lining structure // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 813 – 824. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.10.007.
4. *Zijian Ye, Yuyou Yang, Ying Ye* Three-dimensional effects of multiple voids behind lining on the mechanical behavior of tunnel structure // *Ain Shams Engineering Journal*. 2023, vol. 14, no. 4, article 101949. DOI: 10.1016/j.asej.2022.101949.
5. *Hai-Xiang Tang, Shi-Guo Long, Ting Li* Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 228, article 116762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116762.
6. *Voznesenskii A. S., Nabatov V. V.* Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 254 – 261. DOI: 10.1016/j.tust.2017.07.010.
7. *Fei Yao, Chen Guangyu* Time-frequency analysis of impact echo signals of grouting defects in tunnels // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019, vol. 55, no. 8, pp. 581 – 595. DOI: 10.1134/S1061830919080102.
8. *Андреианов С. В.* Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 5. – С. 124 – 132. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.
9. *Барышников В. Д., Хмелинин А. П., Денисова Е. В.* Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 1. – С. 30 – 38.
10. *Fei Xu, He Li, Hongge Yao, MingShou An* Detection method of tunnel lining voids based on guided anchoring mechanism // *Computers & Electrical Engineering*. 2021, vol. 95, article 107462. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107462.
11. *Соколов К. О.* Частотно-временное представление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 2. – С. 77 – 81.
12. *Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V.* Spectral characteristics of acoustic emission in carbon fiber-reinforced composite materials subjected to cyclic loading // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 2018, article 1962679. DOI: 10.1155/2018/1962679.
13. *Федорова Л. Л., Соловьев Е. Э., Соколов К. О., Куляндин Г. А.* Георадиолокационные исследования геокриологических объектов массива горных пород месторождений криолитозоны // *Горный журнал*. – 2019. – № 2. – С. 38 – 42. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.07.
14. *Никитин А. А., Хмелевской А. А.* Комплексование геофизических методов. – Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2004. – 294 с.
15. *Капустин В. В., Чуркин А. А., Ширококов М. П.* Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит // *Геотехника*. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 68 – 79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79.
16. *Капустин В. В., Синицин А. В.* Применение атрибутного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования // *Геофизика*. – 2018. – № 2. – С. 17 – 23.
17. *Пудова Н. Г., Капустин В. В., Кувалдин А. В.* Применение атрибутного анализа для интерпретации георадиолокационных данных: препринт. URL: <https://geoinfo.ru/pro>

duct/pudova-natalya-gennadevna/primeneniye-atributnogo-analiza-dlya-interpretacii-georadiolokacionnyh-dannyh-36819.shtml (дата обращения: 16.01.2022).

18. *Набатов В. В., Уткина А. В.* Анализ поведения добротности и ее составляющих при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе «обделка–грунт» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 142–155. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_142.

19. *Набатов В. В., Гайсин Р. М., Вознесенский А. С.* Георадиолокационная оценка качества контакта «обделка–грунт» в условиях тоннелей метрополитенов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 9. – С. 157–163. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_142.

20. *Набатов В. В., Вознесенский А. С.* Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Горный журнал. – 2015. – № 2. – С. 15–20. **МЛБ**

## REFERENCES

1. Jia-Xuan Zhang, Ning Zhang, Annan Zhou, Shui-Long Shen Numerical evaluation of segmental tunnel lining with voids in outside backfill. *Underground Space*. 2022, vol. 7, no. 5, pp. 786–797. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.12.007.

2. Chengping Zhang, Bo Min, Haili Wang, Sulei Zhang Mechanical properties of the tunnel structures with cracks around voids behind linings. *Thin-Walled Structures*. 2022, vol. 181, article 110117. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110117.

3. Dingli Zhang, Tong Xu, Huangcheng Fang, Qian Fang, Liqiang Cao, Ming Wen Analytical modeling of complex contact behavior between rock mass and lining structure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 813–824. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.10.007.

4. Zijian Ye, Yuyou Yang, Ying Ye Three-dimensional effects of multiple voids behind lining on the mechanical behavior of tunnel structure. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023, vol. 14, no. 4, article 101949. 10.1016/j.asej.2022.101949.

5. Hai-Xiang Tang Shi-Guo Long, Ting Li Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 228, article 116762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116762.

6. Voznesenskii A. S., Nabatov V. V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 254–261. DOI: 10.1016/j.tust.2017.07.010.

7. Fei Yao, Chen Guangyu Time-frequency analysis of impact echo signals of grouting defects in tunnels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019, vol. 55, no. 8, pp. 581–595. DOI: 10.1134/S1061830919080102.

8. Andrianov S. V. GPR monitoring of space between lining and rock in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 124–132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

9. Baryshnikov V. D., Khmelinin A. P., Denisova E. V. GPR detection of inhomogeneities in concrete lining of underground tunnels. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no. 1, pp. 30–38. [In Russ].

10. Fei Xu, He Li, Hongge Yao, MingShou An Detection method of tunnel lining voids based on guided anchoring mechanism. *Computers & Electrical Engineering*. 2021, vol. 95, article 107462. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107462.

11. Sokolov K. O. Frequency-time presentation of georadar profiles based on continuous wavelet transform. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no. 2, pp. 77–81. [In Russ].

12. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V. Spectral characteristics of acoustic emission in carbon fiber-reinforced composite materials subjected to cyclic loading. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 2018, article 1962679. DOI: 10.1155/2018/1962679.

13. Fedorova L. L., Soloviev E. E., Sokolov K. O., Kulyandin G. A. GPR research of geocryological objects in rock mass in permafrost zone. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 2, pp. 38–42. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.07.
14. Nikitin A. A., Khmelevskoy A. A. *Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov* [Geophysical methods complexation], Tver, ООО «Izdatel'stvo GERS», 2004, 294 p.
15. Kapustin V. V., Churkin A. A., Shirobokov M. P. Experience of ground penetrating radar application for foundation slabs quality control. *Geotekhnika*. 2021, vol. 13, no. 1, pp. 68–79. [In Russ]. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79.
16. Kapustin V. V., Sinitsin A. V. The application of attribute analysis for the solution of applied problems of GPR profiling. *Geofizika*. 2018, no. 2, pp. 17–23. [In Russ].
17. Pudova N. G., Kapustin V. V., Kuvaldin A. V. *Primenenie atributnogo analiza dlya interpretatsii georadiolokatsionnykh dannykh* [Application of attribute analysis for GPR data interpretation], available at: <https://geoinfo.ru/product/pudova-natalya-gennadevna/primenenie-atributnogo-analiza-dlya-interpretatsii-georadiolokatsionnykh-dannykh-36819.shtml> (accessed 16.01.2022).
18. Nabatov V. V., Utkina A. V. Behavior of the quality factor and its constituents in radar detection of voids at the rock–lining interface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 142–155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_142.
19. Nabatov V. V., Gaisin R. M., Voznesenskiy A. S. Geo radar data-based assessment of ground–and–lining contact surface quality in underground railway tunnels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 9, pp. 157–163. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_142.
20. Nabatov V. V., Voznesenskiy A. S. Georadar detection of voids at the soil–lining interface in subway tunnels. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 2, pp. 15–20. [In Russ].

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Набатов Владимир Вячеславович<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: nv4@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-0047-0462,

Уткина Александра Валерьевна<sup>1</sup> — аспирант,  
e-mail: alex-av7@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Набатов В.В., e-mail: nv4@mail.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Nabatov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant Professor, e-mail: nv4@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-0047-0462,

A.V. Utkina<sup>1</sup>, Graduate Student,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS»,  
119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** V.V. Nabatov, e-mail: nv4@mail.ru.

Получена редакцией 05.04.2023; получена после рецензии 11.05.2023; принята к печати 10.06.2023.

Received by the editors 05.04.2023; received after the review 11.05.2023; accepted for printing 10.06.2023.

