

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622:550.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ В КАЧЕСТВЕ ИДЕНТИФИКАТОРА ВЫЯВЛЕНИЯ СТРОЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГЕОРАДАРОВ

В. В. Набатов

*Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
E-mail: ftkp@mail.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

Разработана методика выявления водонасыщенных областей вблизи выработок по результатам съемок георадарами с резистивно-нагруженными антеннами. Основной идентифицирующий параметр (атрибут) методики — информационная энтропия, характеризующая специфику функции распределения амплитуд георадиолокационных трасс. Способность выделять на профиле аномалии с помощью атрибута возникает после проведения выравнивания амплитуд. Дается методика обработки трасс, примеры ее применения, объясняются причины эффективности энтропийного параметра. Для сравнения рассматриваются альтернативные идентифицирующие параметры, которые проигрывают энтропийному либо по причине низкой способности выделять аномальные участки профилей, либо из-за низкой помехоустойчивости.

Нарушенные и водонасыщенные зоны, массив пород, георадары, резистивно-нагруженные антенны, атрибут, распознавание, информационная энтропия

Для безопасной проходки горных выработок, ведения очистных работ, строительства и эксплуатации подземных транспортных тоннелей или коллекторов важно иметь информацию о строении массива горных пород. Часто необходимо выявлять водоносные горизонты, зоны активного трещинообразования и повышенных напряжений, карстовые воронки, водонасыщенные линзы, палеорусла рек [1–5]. Необходимо также решать технические вопросы, такие как оценивание состояния обделки выработок [6], определение мощности водозащитных целиков [4], качество закрепления массива [7]. Для решения указанных задач используются георадиолокационные наблюдения, которые включают съемку как из подземной выработки, так и с поверхности. При этом в связи с протяженностью объектов приходится иметь дело с большими объемами данных, требующих трудоемких операций обработки и интерпретации [8–10]. Атрибутный анализ, широко применяемый в сейсморазведке [11] и геоакустическом контроле [12–14], позволяет извлекать дополнительную информацию из данных и частично автоматизировать их обработку. Атрибуты способны указывать на проблемные места, которые в дальнейшем могут быть проанализированы оператором с принятием решений о специфике строения участка массива пород и выбором — “опасный” участок либо “неопасный”.

Если в сейсморазведке атрибутный анализ играет существенную роль, то в георадиолокации наблюдается недостаток работ в этой области [8, 15]. В иностранных публикациях тема представлена шире [16–18], однако ее разработанность несравнима с таковой в области сейсмо-

разведки. Возможно, это связано со спецификой получаемых сигналов, с многопериодичностью излучаемых и принимаемых импульсов. Георадары с резистивно-нагруженными антеннами формируют импульс, содержащий не более двух полупериодов [19–21], что может решить проблему многопериодичности.

Статья посвящена вопросам использования в качестве атрибута информационной энтропии, вычисляемой по распределениям амплитуд георадиолокационных трасс. Энтропия применяется в различных методах геоконтроля: в качестве оценок информативности и необходимости мониторинга [10, 22] как критерий, позволяющий принимать решение о минимальном количестве параметров контроля при прогнозировании устойчивости горных выработок [23]; в качестве метода обработки волнового поля [24]. Однако для поиска водонасыщенных линз вблизи выработок этот параметр используется впервые.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве атрибута взята информационная энтропия, способная индифицировать присутствие под профилем водонасыщенных линз. Данные в примерах получены с помощью низкочастотного георадара с резистивно-нагруженными антеннами “Лоза-1Н” (средняя частота 50 МГц), особенностью которого являются аperiodический импульс и повышенная мощность источника излучения. При ряде изысканий замечено, что информационная энтропия H в участках профиля, где присутствуют приповерхностные водонасыщенные линзы, испытывает заметные и стабильные изменения; это позволяет рассматривать H как идентифицирующий признак.

Понятие информационной энтропии впервые введено в теории информации, где она характеризует неопределенность реализации какого-либо состояния системы. Энтропия определяется вероятностями всех дискретных состояний системы:

$$H = -\sum_{i=1}^N P_i \log_g P_i,$$

где P_i — вероятности реализации i -го из N состояний системы; g — основание логарифма, определяющее единицы измерения энтропии, при $g = 2$ единицами измерения являются биты.

Энтропия H характеризует также распределения непрерывной случайной величины. Для этой сферы энтропия H_R , описывающая неопределенность поведения случайной величины, рассчитывается через значения ряда распределения вероятностей случайной величины $P_i = f_i \Delta x$, взятых в m дискретных интервалах шириной Δx (так называемых разрядах) следующим образом [25]:

$$H_R = -\sum_{i=1}^m f_i \Delta x \log_g f_i - \log_g \Delta x, \quad (1)$$

где f_i — дискретные отсчеты плотности вероятности в каждом разряде. В таком виде значения $f_i \Delta x$ по своему смыслу соответствуют вероятностям P_i , описывающим попадание очередной реализации случайной величины в отрезок в интервале $x_i + \Delta x$.

Понятие неопределенности, оценкой которого является H_R , можно проиллюстрировать с помощью следующей модели. В среде MathCAD задана функция распределения в виде пяти дискретных значений f_i , которые вводились в программу как количество реализаций k_i случайной величины в рамках i -го разряда случайной величины x . Далее была задана группа распределений, основным отличием которых друг от друга стало количество реализаций в пределах третьего разряда. Это количество попаданий в третий разряд k_3 изменялось от 1 до 20 с шагом 1. На рис. 1 представлены распределения со значениями $k_3 = 1$ (1), $k_3 = 4$ (2), $k_3 = 20$ (3). По всем распределениям рассчитана величина H_R (при $g = 2$), значения которой отстроены в виде графика $H_R(k_3)$.

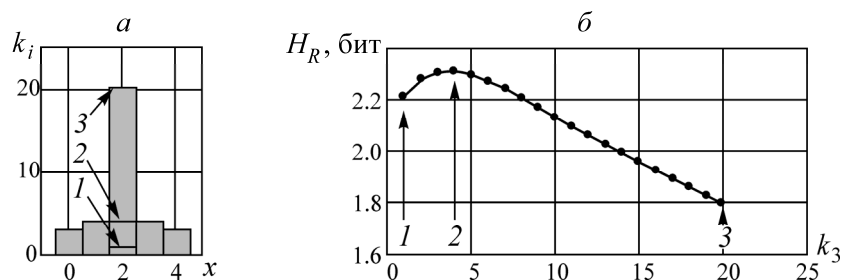


Рис. 1. Модель распределения с изменяющимся значением k_3 (а) и изменение энтропии для ряда распределений 1–3 (б)

Распределение 1 на рис. 1а оценим как распределение с относительно низкой неопределенностью по сравнению с другими примерами. В этом случае поведение случайной величины x при следующей реализации скорее всего не попадет в третий разряд. Подобную оценку можно дать и распределению 3, с тем отличием, что здесь, наоборот, стоит ожидать более высокой вероятности попадания x в третий разряд. Относительно высокая определенность поведения случайной величины должна приводить к низкой энтропии распределения. Это и наблюдается на рис. 1б в точках 1 и 3.

Про распределение 2 можно сказать, что здесь случайная величина ведет себя более неопределенно. Значения f_2, f_3, f_4 равны друг другу (количество попаданий в третий разряд сравнялось с количеством попаданий во второй и четвертый), и труднее определить, в какой из них попадет случайная величина при ее очередной реализации. Неопределенность поведения случайной величины возросла, что показывает график $H_R(k_3)$, на котором точка, соответствующая описываемому распределению, указана цифрой 2.

Характеристику H_R можно получить и для распределений амплитуд A георадиолокационной трассы. На рис. 2 показаны два примера таких распределений (георадар “Лоза-1Н”, амплитуды выровнены). Распределение 1 получено при анализе трассы, снятой над водонасыщенной линзой, распределение 2 — при анализе трассы вне влияния линзы. Видно, что при наличии водонасыщенной линзы распределение расширяется и начинает стремиться к равномерному, что повышает неопределенность поведения случайной величины и увеличивает значение H_R .

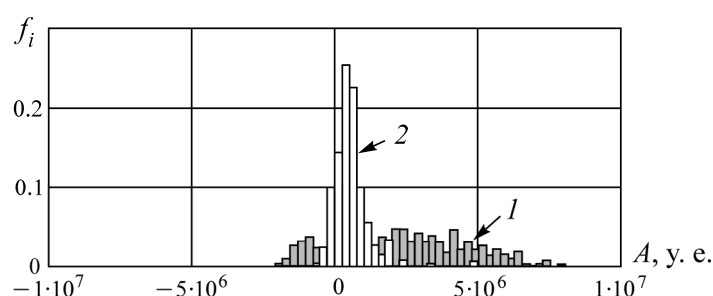


Рис. 2. Примеры распределений выровненных амплитуд георадиолокационных трасс: 1 — трасса получена над водонасыщенной линзой; 2 — трасса получена вне влияния водонасыщенной линзы

Объяснить вариации формы распределений можно на примере трасс (рис. 3). Если волновая форма, полученная вне водонасыщенной линзы, имеет амплитудные значения, находящиеся вблизи нуля (трасса 1), то сигнал, прошедший через водонасыщенные породы, испытывает смещения (трасса 2), в нем появляется низкочастотный “хвост”, делающий распределение амплитуд более растянутым. Причиной этого называют прохождение сигнала через среду с высокой проводимостью [26, 27].

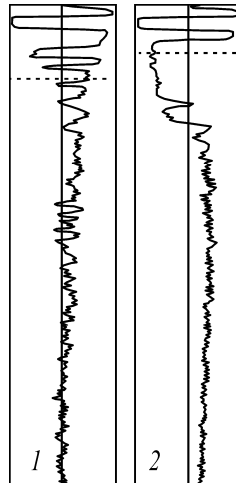


Рис. 3. Примеры георадиолокационных трасс: 1 — трасса получена вне водонасыщенной линзы; 2 — трасса получена над водонасыщенной линзой

Приведенный на рис. 2 пример является одним из наиболее ярких. В типичном наборе распределений амплитуд различия между распределениями аномальных и обычных трасс менее заметны и не так сильно различаются по ширине. Однако большие значения H_R , взятые вдоль профиля в виде функции $H_R(l)$, где l — привязка точки на профиле, стабильно указывают на те участки массива, под которыми находятся водонасыщенные линзы. При этом для хорошей выделяемости аномальных мест необходимо учесть ряд специфических особенностей.

Во-первых, для вычисления H_R потребовалось использовать выражение, отличное от (1). Элемент $\log_g \Delta x$ зависит от ширины интервала случайной величины $x_i + \Delta x$ и за счет вариаций диапазона значений, в котором существует случайная величина, может варьировать сам и создавать зашумляющее воздействие на график $H_R(l)$. Поэтому элемент $\log_g \Delta x$ опускался — подобным образом вычисляемую энтропию иногда называют приведенной [25]. Далее функция изменения приведенной энтропии вдоль профиля будет обозначаться как $H_A(l)$.

Во-вторых, при отсутствии выравнивания слишком большие амплитуды прямой волны искажают форму распределений и идентифицирующий эффект $H_A(l)$ становится слабо выраженным, либо не наблюдается. В процессе разработки методики опробовано несколько выравнивающих функций: прямая, экспоненциальная, сигмоидальная. Функция выравнивания $S(n)$ применялась следующим образом:

$$A_E(n) = A(n)S(n),$$

где $A_E(n)$ — выровненная трасса; $A(n)$ — исходная трасса; n — номер отсчета сигнала. Воздействие выравнивания на результат определялось по контрастности Z функции $H_A(l)$:

$$Z = \frac{\max H_A(l)}{\overline{H_A(l)}},$$

здесь $\max H_A(l)$, $\overline{H_A(l)}$ — максимальное и среднее значение $H_A(l)$ на профиле. По результатам опробований различных функций выравнивания с разными коэффициентами установлено, что наиболее контрастные функции $H_A(l)$ дает сигмоидальное выравнивание. Форма сигмоидальной функции описывается выражением

$$S_1(n) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha n + \beta}},$$

где $S_1(n)$ — амплитудное значение сигмоида в отсчете n ; α, β — коэффициенты сигмоида. Для подбора оптимальных коэффициентов использовалась функция контрастности $Z(\alpha, \beta)$, пример которой представлен на рис. 4. Подбирать по подобным функциям значения α и β можно либо по максимуму, оцениваемому в результате перебора всех значений α и β в некоторых пределах, либо используя методы, аналогичные методу градиентного спуска.

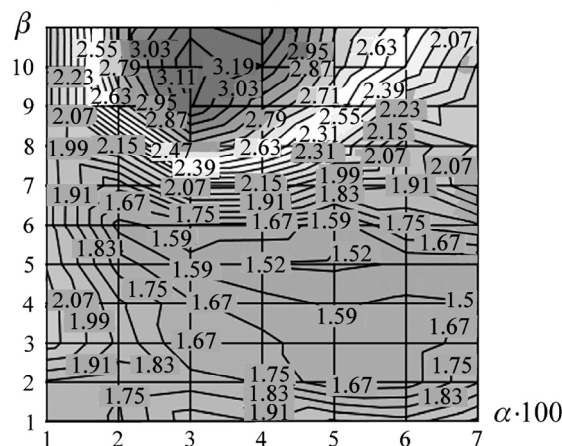


Рис. 4. Функция контрастности $Z(\alpha, \beta)$

Примеры результатов оптимального выравнивания приведены на рис. 5. Трасса 1 получена в точке вне аномалии (вне влияния водонасыщенной линзы), трасса 2 — в точке профиля, под которым находится водонасыщенная линза. На трассы также нанесены выравнивающие сигмоиды 3. Видно, что в обоих случаях распределение амплитуд при выравнивании должно расширяться. Однако сигнал, полученный над линзой и испытавший волновые искажения, расширяется в большей степени, что и приводит к увеличению энтропии случайных величин.

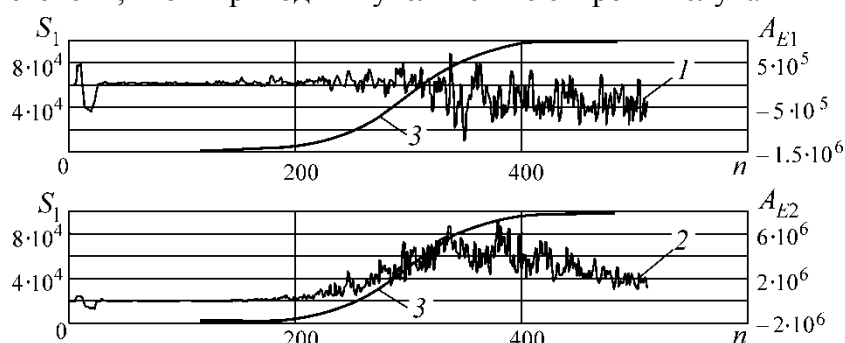


Рис. 5. Трассы, выровненные идентичной сигмоидальной функцией: 1 — трасса $A_{E1}(n)$, полученная вне влияния водонасыщенной линзы; 2 — трасса $A_{E2}(n)$, полученная над водонасыщенной линзой; 3 — выравнивающий сигмоид

В конечном счете граф обработки выглядит следующим образом (рис. 6): задаются значения α и β ; проводится выравнивание амплитуд сигмоидами с коэффициентами α и β ; отстраивается график изменения приведенной энтропии трасс вдоль по профилю $H_d(l)$; вычисляется параметр, оценивающий контрастность в зависимости от коэффициентов $Z(\alpha, \beta)$; после множественного опробования значений α и β получается функция $Z(\alpha, \beta)$. Соответствующие максимуму функции $Z(\alpha, \beta)$ коэффициенты α и β используются для вычисления оптимальной функции $H_{d0}(l)$. Полученная функция $H_{d0}(l)$ позволяет принимать решение о структурных особенностях массива пород (наличие либо отсутствие линз) по порогу.

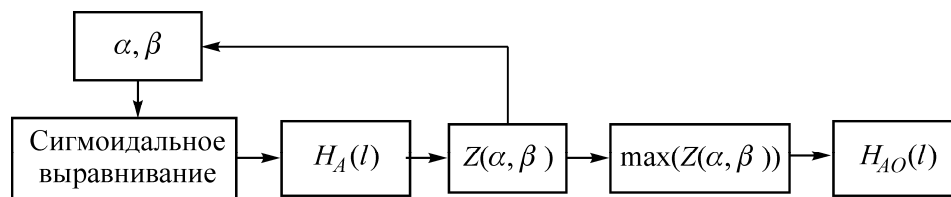


Рис. 6. Граф обработки данных с получением оптимальной функции изменения энтропии вдоль по профилю $H_{AO}(l)$

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Описанная методика применялась в ряде случаев при выявлении водонасыщенных линз вблизи объектов подземного строительства. Наличие линз установлено либо по нарушениям (в частности, известны аварийные участки коллекторов), либо по анализу годографов [28]. На рис. 7 приведена радарограмма и результат ее обработки в виде функции $H_{AO}(l)$. Трассы, которые испытали влияние водонасыщенных линз, выделены пунктирными прямоугольниками (цифра 3). Для приведенного случая контрастность составила $Z = 3.36$. Для других профилей контрастность доходила до уровня $Z = 6.59$.

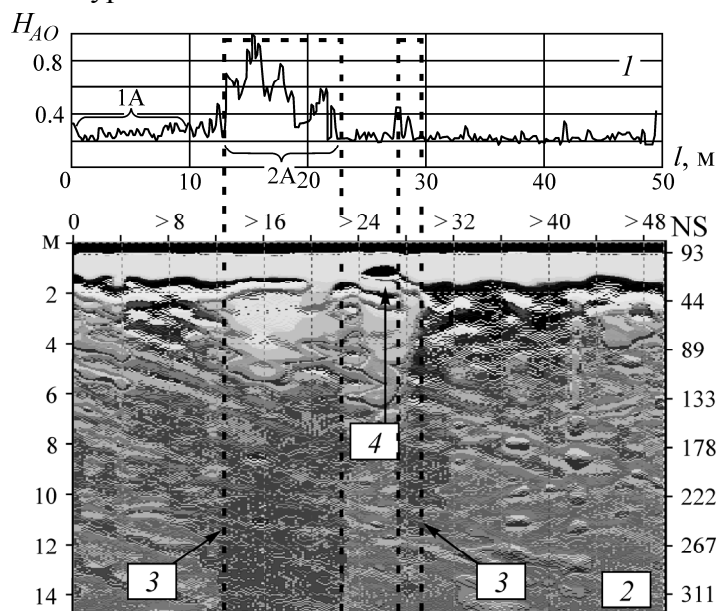


Рис. 7. Результат применения идентификатора: 1 — вычисленная по радарограмме функция $H_{AO}(l)$; 2 — исходная радарограмма; 3 — аномальные зоны; 4 — влияние подземной коммуникации

По теории информации эффективность энтропии, взятой в качестве идентификатора, можно объяснить следующим образом. В месте усложненного строения массива пород неопределенность поведения некоторых измеряемых параметров возрастает. По сравнению с более простой структурой возникает большее количество вариантов строения, таких как выраженность структур, глубина их расположения, варианты неоднородности распределения физических параметров, которые могут принимать широкий спектр значений. В этой ситуации процесс измерения снимает неопределенность. Для георадиолокации эта неопределенность связана с диэлектрической проницаемостью, в большой степени определяемой содержанием воды в породах. В тех местах, где структура массива проще, снимаемая измерением неопределенность ниже, чем в местах с более сложной структурой массива.

Анализ специальной литературы говорит о том, что результаты, получаемые на георадарах “Лоза-1Н” при обследовании бортов карьеров [29] и медно-золоторудных месторождений [26], содержат искажения амплитуд, подобные тем, что приведены на трассе 2 рис. 4. Таким образом, можно предположить, что описываемая методика может использоваться не только на объектах подземного строительства, но и на горных предприятиях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пример, представленный на рис. 8, демонстрирует специфичность работы идентификатора. Этот участок не содержит водонасыщенных линз, а полученная радарограмма существенно зашумлена помехами — “звоном”, хаотической волновой картиной (3), “воздушными” помехами (4), присутствует существенное изменение волновой картины вдоль по профилю (левая часть радарограммы отличается от правой). Несмотря на это, функция $H_{AO}(l)$ не имеет выраженных пиков и максимумов, не реагирует на изменения вдоль по профилю, т. е. показывает устойчивость идентификатора к помехам. Устойчивость иллюстрирует и рис. 7. Здесь на радарограмме просматривается радиообраз от подземной коммуникации (4), однако $H_{AO}(l)$ на него никак не реагирует.

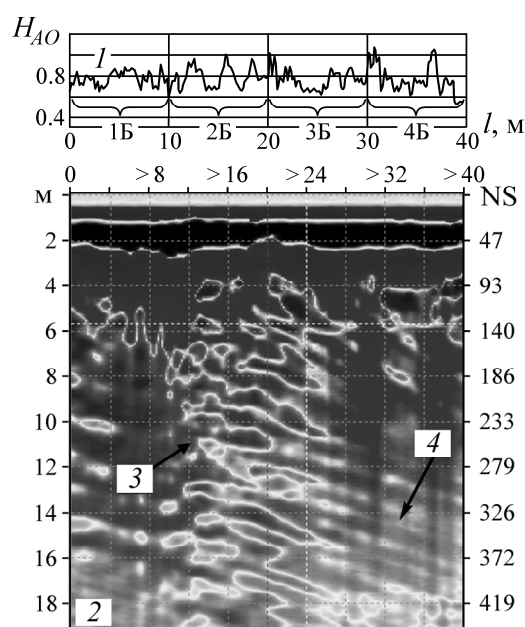


Рис. 8. Специфичность работы идентификатора: 1 — вычисленная по радарограмме функция $H_{AO}(l)$; 2 — исходная радарограмма; 3 — “звон” и хаотическая волновая картина; 4 — “воздушные” помехи

Тезис о специфичности метода подтверждается с помощью гипотезы о равенстве средних. Так, например, участки функции $H_{AO}(l)$ на рис. 7 в диапазоне 0–10 м (участок 1А) и 12–24 м (участок 2А) должны иметь разные средние, поскольку на участке 2А наблюдается аномалия. Ряд участков функции $H_{AO}(l)$ на рис. 8, такие как 0–10 м (участок 1Б), 10–20 м (участок 2Б), 20–30 м (участок 3Б), 30–40 м (участок 4Б), отличаться по средним не должны, поскольку здесь аномалия отсутствует. Фактически речь идет о выборках случайных величин. Для проверки равенства их средних обычно используют t -статистику [30]:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

где $\bar{X}_1, \bar{X}_2$ — средние значения выборок; n_1, n_2 — объемы выборок; σ_1, σ_2 — дисперсии выборок. Получаемая таким образом t -статистика имеет распределение Стьюдента, со степенями свободы $d = n_1 + n_2 - 2$. Последнее имеет двухстороннее критическое значение t -статистики $t_{кр}$, определяемое уровнем значимости p . Если t оказывается за положительным либо отрицательным пределом $t_{кр}$, то гипотеза о равенстве средних отвергается.

Среди предъявляемых к случайным величинам требованиям о “несвязанности” выборок, нормальности распределений, однородности дисперсий, последнее может нарушаться. Особенно это заметно для участков 1А и 2А. Для преодоления проблемы извлечение выборок проводилось так, чтобы они имели одинаковый объем. В таком случае нарушение требования однородности дисперсии считается несущественным [31].

При $p = 0.05$ и $n_1 = n_2 = 49$ $t_{кр} = \pm 1.985$. Для участков 1А и 2А $t = -10.56$, т. е. на участках с аномалией и без нее средние различаются. В то же время, если вычислять для всех пар участков 1Б–4Б t -статистики, они оказываются внутри диапазона $t_{кр} = \pm 1.985$, т. е. равенство средних не отвергается. Средние по участкам, указанным на рис. 8, представлены ниже:

1Б–2Б	1Б–3Б	1Б–4Б	2Б–3Б	2Б–4Б	3Б–4Б
–0.67	+0.78	+0.55	+1.27	+0.98	–0.03

Помимо работы с энтропийными характеристиками случайной величины также опробованы другие характеристики, такие как моменты случайных величин и спектральные параметры.

На рис. 9 представлены функции изменения вдоль по профилю моментов выровненных амплитуд георадиолокационных трасс, вычисленных по данным радарограммы рис. 7. Показаны изменения асимметрии $Sk(l)$ вдоль по профилю и неприведенного к значению эксцесса нормального распределения коэффициента $Kr(l)$. Для получения максимально контрастной функции амплитуды выравнивались в соответствии с графом обработки рис. 6. Отмечено, что характер изменчивости $Sk(l)$ становится другим в “аварийной зоне” ($l = 12–23$ м), однако этот результат подавлен хаотичным поведением $Sk(l)$ слева и справа от нее. Характеристика $Kr(l)$ практически не реагирует на “аварийную зону”.

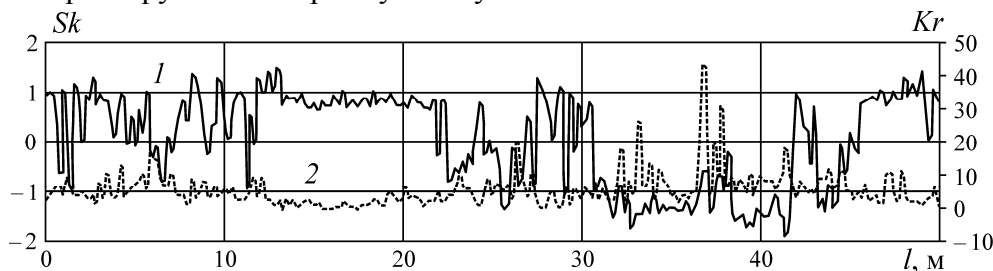


Рис. 9. Примеры использования альтернативных атрибутов: 1 — асимметрия $Sk(l)$; 2 — эксцесс $Kr(l)$

Дисперсия $D(l)$ хорошо реагирует на аварийный участок. Характер поведения функции $D(l)$ относительно близок к поведению функции энтропии $H_{AO}(l)$, которая приведена на кривой 1 рис. 7. При этом контраст $Z = 13.46$ по $D(l)$ существенно превосходит контраст по $H_{AO}(l)$. Однако у дисперсии есть существенный недостаток — она гораздо чаще, чем $H_{AO}(l)$, реагирует на помеховые факторы. Это иллюстрирует рис. 10, на котором представлена радарограмма и полученные из нее функции $H_{AO}(l)$ и $D(l)$ (кривые 2 и 3 соответственно). Здесь между 4-м и 9-м метром профиля находится аварийная коммуникация — текущая труба (4). Оба атрибута, $H_{AO}(l)$ и $D(l)$, реагируют на аварийный участок пиками, которые по пороговому правилу позволяют выделить в объеме съемок аварийную область (5). Однако в правой части, на неаварийном участке, $H_{AO}(l)$ не дает никаких аномалий (6), в то время как $D(l)$ указывает на ничем не под-

твержденный аномальный участок (7). Можно предположить, что это ложное срабатывание связано с “воздушными” помехами, которые наблюдаются внизу радарограммы. Слева от аварийной области можно наблюдать подобную ситуацию — ложные срабатывания $D(l)$ и отсутствие срабатываний $H_{AO}(l)$.

Появление низкочастотного компонента в сигнале (кривая 2 на рис. 2) способно влиять на амплитудный фурье-спектр. Однако проверка спектральных характеристик показала, что изменения частоты спектрального пика слишком малы и нестабильны, “тонут” в вариациях значений, полученных на неаварийных участках профиля. При применении выравнивания амплитуд выявлен эффект, когда в аварийной части профиля максимумом спектра становится нулевая гармоника. Такой эффект часто возникает и вне аварийного участка, что не позволяет использовать данную характеристику как идентифицирующую. Работы с вейвлетными спектрами обнаружили, что скалограммы на определенных масштабах в случае, если трасса снята над водонасыщенной линзой, испытывают изменения законов распределения получаемых вейлет-коэффициентов. Эти изменения таковы, что их статистические характеристики могут работать как идентифицирующие. Условием работы такого подхода по-прежнему является оптимальное выравнивание амплитуд исходной трассы, получаемое перебором коэффициентов выравнивающей функции. Недостатком работы со скалограммами можно назвать избыточно сложный граф обработки, требующий помимо функции выравнивания подбирать оптимальный масштаб вейвлета.

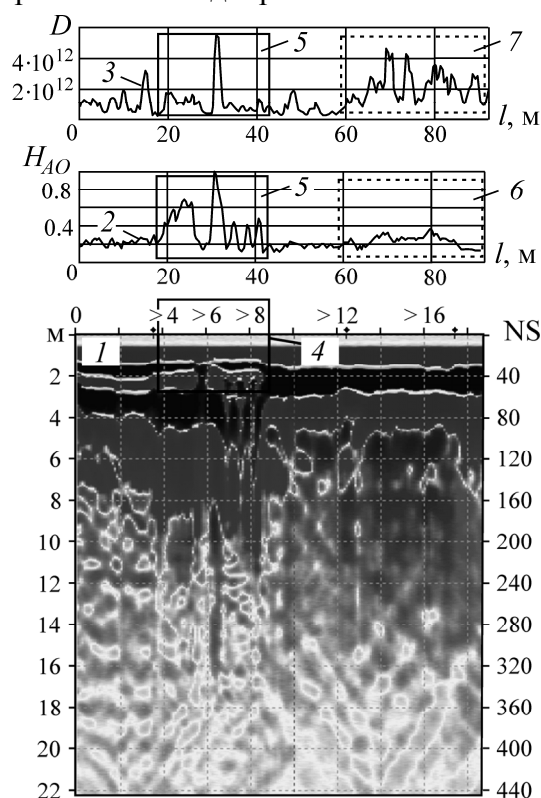


Рис. 10. Сравнение функций энтропии и дисперсии: 1 — исходная радарограмма; 2 — функция энтропии $H_{AO}(l)$; 3 — функция дисперсии $D(l)$; 4 — аварийная зона; 5 — область верного срабатывания; 6 — область корректного срабатывания $H_{AO}(l)$; 7 — область ложного срабатывания $D(l)$

ВЫВОДЫ

Предложен граф обработки, а также вычисляемый с его помощью атрибут, который позволяет выявлять водонасыщенные линзы в приповерхностной части массива пород при работе с данными, полученными на георадарах с резистивно-нагруженными антеннами. В качестве

атрибута для каждой трассы выступает приведенная энтропия выровненных амплитуд. Функция контрастности, вычисляемая как отношение максимального значения атрибута, наблюдаемого в области аномалии, к среднему значению атрибута на профиле, достигает $Z = 6.59$.

При сравнении с другими характеристиками, такими как спектральные характеристики и статистические моменты выровненных амплитуд, показано, что потрассовая энтропия обладает большей способностью выявлять объекты (по сравнению, например, с экцессом), а также обладает избирательностью по отношению к помехам. Так, несмотря на то что дисперсия дает более высокие значения контрастности ($Z = 13.46$), в ряде случаев она слишком существенно реагирует на помехи, в то время как функция энтропии их не замечает.

Описанная методика опробована на объектах подземного городского строительства, вблизи которых выполнялся поиск водонасыщенных линз, а также картировались зоны разлива вод, поступающих из подземных коммуникаций. Причины, вызывающие изменение энтропии, в большой степени связаны с изменением проводимости массива пород, определяемой содержанием в нем воды. Это позволяет предположить, что используемая методика будет эффективна при поиске нарушенных зон как в грунтовых массивах пород, так и в уступах карьеров либо вблизи горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li S. C., Zhou Z. Q., Ye Z. H., Li L. P., Zhang Q. Q., Xu Z. H. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel, J. Appl. Geophys., 2015, Vol. 116. — P. 247–257.
2. Вознесенский А. С., Набатов В. В. Оценка трещинообразования в массиве с гипсосодержащими породами методом регистрации электромагнитного излучения // ФТПРПИ. — 2003. — № 3. — С. 3–12.
3. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кормнов А. А. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 456–461.
4. Вознесенский А. С., Набатов В. В., Пончуков Н. П. Определение мощности защитного целика в кровле выработок гипсового рудника георадами // ГИАБ. — 2004. — № 2. — С. 10–14.
5. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Особенности акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композиционных материалах и их использование для контроля напряжений в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 127–224.
6. Барышников В. Д., Хмелинин А. П., Денисова Е. В. Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 30–38.
7. Простов С. М., Никулин Н. Ю. Закономерности изменения физических свойств грунтового массива при экспериментальном электрохимическом закреплении // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 58–67.
8. Денисов Р. Р., Капустин В. В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. — 2010. — № 4. — С. 76–80.
9. Набатов В. В., Вознесенский А. С. Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Горн. журн. — 2015. — № 2. — С. 15–20.
10. Простов С. М., Никулин Н. Ю. Георадиолокационный мониторинг при укреплении грунтовых оснований горнотехнических сооружений в Кузбассе // Вестн. КГТУ. — 2015. — № 5. — С. 11–18.
11. Verma A. K., Chaki S., Routray A., Mohanty W. K., Jenamani M. Quantification of sand fraction from seismic attributes using Neuro-Fuzzy approach, J. Appl. Geophys., 2014, Vol. 111. — P. 141–155.

12. **Nikolenko P. V., Nabatov V. V.** Interference protection in geoacoustic control of critical stresses in rocks, *Gornyi Zhurnal*, 2015, No. 9. — P. 33–36.
13. **Гиляров В. Л., Дамаскинская Е. Б., Кадомцев А. Г., Рассказов И. Ю.** Анализ статистических параметров данных геоакустического мониторинга на месторождении “Антей” // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 40–45.
14. **Санфиров И. А., Бабкин А. И., Ярославцев А. Г., Байбакова Т. В., Калашникова М. М.** Аппаратурно-методическое обеспечение сейсмоакустического мониторинга затюбингового пространства шахтных стволов // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 18–22.
15. **Замотайлов О. В.** Задачи распознавания изображений прибора подповерхностной радиолокации на базе мобильной дорожной лаборатории // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2010. — № 6. — С. 38–42.
16. **Forte E., Pipan M., Casabianca D., Cuia R. Di., Riva A.** Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes, *J. Appl. Geophys.*, 2012, Vol. 81. — P. 76–87.
17. **Moysey S., Knight R. J., Jol H. M.** Texture-based classification of ground-penetrating radar images, *Geophysics*, 2006, Vol. 71, No. 6. — P. K111–K118.
18. **Hong S., Wai-Lok Lai W., Wilsch G., Helmerich R., Gunther T., Wiggenger H.** Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR, *Construction and Building Materials*, 2014, Vol. 66. — P. 671–684.
19. **Набатов В. В., Гайсин Р. М., Гораньков И. И.** Опыт георадиолокационного обследования массива для прогнозирования условий щитовой проходки коллекторов в условиях мегаполиса // ГИАБ. — 2011. — № 8. — С. 202–211.
20. **Набатов В. В., Морозов П. А., Семенихин А. Н.** Выявление подземных коммуникаций на площадке строительства с помощью георадаров с резистивно-нагруженными антеннами // ГИАБ. — 2012. — № 10. — С. 120–134.
21. **Сайт ОАО “ВНИИСМИ”.** Георадары серии “Лоза”: [Электронный документ]. (<http://www.geo-radar.ru/articles/article2.php>). Проверено 05-04-2016.
22. **Ямщиков В.С., Вознесенский А.С.** Информационные основы контроля геомеханических процессов // ФТПРПИ. — 1994. — № 3. — С. 3–11.
23. **Ямщиков В.С., Вознесенский А.С.** Информационные основы технологического контроля устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — 1980. — № 6. — С. 99–105.
24. **Zhang Yu., Candra P., Wang G., Xia T.** 2-D Entropy and Short-time fourier transform to leverage GPR data analysis efficiency, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, Vol. 64, No. 1. — P. 103–111.
25. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 1998. — 576 с.
26. **Пчелка В. Я., Фрейман Г. Г., Михно А. Н., Мальченко Е. Г., Мальченко Т. Д.** Опыт применения георадаров серии “Лоза” при поисках перекрытых медно-золоторудных зон // Геология и охрана недр. — 2012. — № 2(43). — С. 82–88.
27. **Копейкин В. В.** Распространение электромагнитных импульсов в подземной среде: [Электронный документ]. (<http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php>). Проверено 05-04-2016.
28. **Набатов В. В.** Георадиолокационные обследования массивов пород вблизи аварийных коллекторов с привлечением данных СМР-измерений // ГИАБ. — 2015. — № 3. — С. 197–206.
29. **Калашик А. И., Казачков С. В., Сохарев В. А., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю., Демахин А. Ю.** Георадарные определения состояния и структуры уступов карьера “Железный” Ковдорского ГОКа / гл. ред. Н. Н. Мельников // Глубокие карьеры: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 18-22 июня 2012 г., Апатиты. — СПб., 2012. — 488 с.
30. **Дэвис Дж. С.** Статистический анализ данных в геологии. — Кн. 1. — М.: Недра, 1990. — 319 с.
31. **Шеффе Г.** Дисперсионный анализ. — М.: Наука, 1980. — 512 с.

Поступила в редакцию 12/XII 2016