УДК 550.83

В.В.ГЛАЗУНОВ, *д-р техн. наук, профессор, VVGlazounov@mail.ru*
С.М.ДАНИЛЬЕВ, *канд. геол.-минерал наук, ассистент, Daniliev@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.V.GLAZUNOV, *Dr. in eng. sc., professor, VVGlazounov@mail.ru*
S.M.DANILYEV, *PhD in geol. & min. sc., assistant lecturer, Daniliev@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОБОСНОВАНИЕ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ СКАЛЬНОГО МАССИВА МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены возможности георадиолокационных исследований для оценки степени трещиноватости скальных массивов. Выполнено математическое моделирование волновых электромагнитных полей трещин скальных массивов. Сформулирована классификация волновых электромагнитных полей от скальных массивов с различной степенью трещиноватости. Намечены перспективы применения метода георадиолокации при изучении трещин скальных пород.

***Ключевые слова*:** георадиолокация, скальные массивы, трещиноватость, моделирование, степень трещиноватости.

RATIONALE FOR ASSESSING THE DEGREE OF FRACTURING ROCK MASS BY GPR BASED ON MATHEMATICAL MODELING

The possibilities of GPR method to assess the degree of fracturing rocks. The mathematical modeling of the wave electromagnetic fields of rock fracture arrays. We formulate the classification of the wave electromagnetic fields on the rock mass, with varying degrees of fracturing. The prospects of applying the method of GPR in the study of rock fractures.

Key words: GPR-method, rock mass, fractures zone, mathematical modeling, the degree of fracturing.

Основной задачей инженерно-геофизических исследований состояния скальных массивов является оценка степени трещиноватости пород. Трещиноватость снижает устойчивость пород и потому ее изучение имеет большое значение для проектирования инженерных сооружений. Изучение трещиноватости включает определение пространственного расположения отдельных трещин и оценку степени трещиноватости скального массива в целом. Степень трещиноватости пород принято характеризовать такими параметрами, как коэффициент трещинной пустотности и модуль трещиноватости. В зависимости от значений этих параметров различают зоны и участки пород сильной, средней и слабой трещиноватости [1].

Для получения данных о трещиноватости нужно определить пространственное положение как отдельных трещин, так и их системы в скальном массиве. Локализация и определение параметров трещин по геофизическим данным являются сложной задачей и требуют применения методов, обладающих очень высокой пространственной разрешающей способностью. Накопленный опыт исследования инженерных объектов и скальных массивов показал, что метод георадиолокации удовлетворяет специфике задачи и позволяет обеспечить проведение исследования трещиноватости с высокой эффективностью, оперативностью и детальностью [3,4].

Для развития потенциальных возможностей метода георадиолокации необходи-

мы исследования, направленные на совершенствование и обоснование технологий интерпретации георадиолокационных данных, базирующихся на результатах теоретических и экспериментальных исследований.

Для изучения волновых электромагнитных полей, наблюдаемых на радарограммах скальных пород, осложненных трещиноватостью, выполнено математическое моделирование волновых полей.

Волновые поля вычислены для двух классов моделей трещиноватости, первая из которых представляет собой разрез скальных пород, вмещающий отдельную трещину тектонического происхождения, а вторая – систему трещин выветривания. Модель первого класса является параметрической, т.е. описывается геометрическими и электрофизическими параметрами трещины. Электромагнитное поле этой модели анализируется в рамках принципов кинематических интерпретаций. Модель второго класса является стохастической, так как значения ее параметров имеют вероятностный характер. Основными параметрами электромагнитного поля в этом случае являются динамические характеристики, описывающие процессы диссипации волнового поля.

Математическое моделирование электромагнитных волновых полей электрофизических моделей трещин выполнено численным способом на основе уравнений Максвелла. Моделирование сложных неоднородных сред, включая многофазовые, базируется на процедурах вычислений, основанных на методе элементов. Модель в этом методе представляет исследуемую среду в виде набора элементарных ячеек ограниченного размера, для которых заданы значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ε и проводимости σ. Компоненты внутреннего поля рассчитываются для набора элементарных ячеек, местоположение и электромагнитные свойства которых заданы в сетчатой модели.

Инженерно-геологический разрез скального массива можно рассматривать, как многофазную систему, состоящую из минерального скелета и трещин, заполненных минеральными частицами, водой или воздухом.

Для изучения особенностей волнового электромагнитного поля построены параметрические модели отдельных тектонических и эндогенных трещин (рис.1,а). Заполнителем трещин являются вода ($\varepsilon = 81$, $\sigma = 0{,}01$ См/м) или воздух ($\varepsilon = 1$, $\sigma = 0{,}0$ См/м). Скальный массив, вмещающий трещину, характеризуется значениями электрофизических параметров $\varepsilon = 6$, $\sigma = 0{,}0005$ См/м.

При математическом моделировании волнового электромагнитного поля приняты следующие параметры антенной системы: центральная частота зондирующих импульсов 700 МГц; база антенны – 20 см. Данная антенна георадара ОКО-2 обычно используется для изучения трещиноватости скальных массивов. Шаг точек зондирования по профилю равен 2 см.

Теоретические радарограммы трещины, заполненной водой (рис.1, *б*) или воздухом (рис.1, *в*), отчетливо проявляется в виде отраженных, дифрагированных и кратных электромагнитных волн. Длина и положение трещины определяют протяженность и угол наклона оси синфазности отраженной волны. Материал заполнения трещин характеризуют динамические параметры (фаза и частота) этих типов волн. Анализ динамики волнового поля позволяет определить заполнение трещины. Фазовые сдвиги и смещение частоты энергетического спектра электромагнитного поля являются атрибутами, указывающими на материал заполнения трещины. Заполнение водой приводит к уменьшению частоты, а заполнение воздухом – к инверсии фазы отраженной электромагнитной волны.

Более адекватный электромагнитный образ трещины можно получить, выполнив процедуру миграции волнового поля и трансформировав радарограмму с помощью преобразования Гильберта в энергограмму (рис.1, *в*). Энергограмма практически не осложнена побочными дифракционными эффектами и потому отражает пространственное положение и раскрытие трещины более наглядно.

Влияние угла наклона трещины α показывает, что геометрические параметры можно оценить для субгоризонтальных трещин ($\alpha < 40°$, рис.2). При больших значениях α

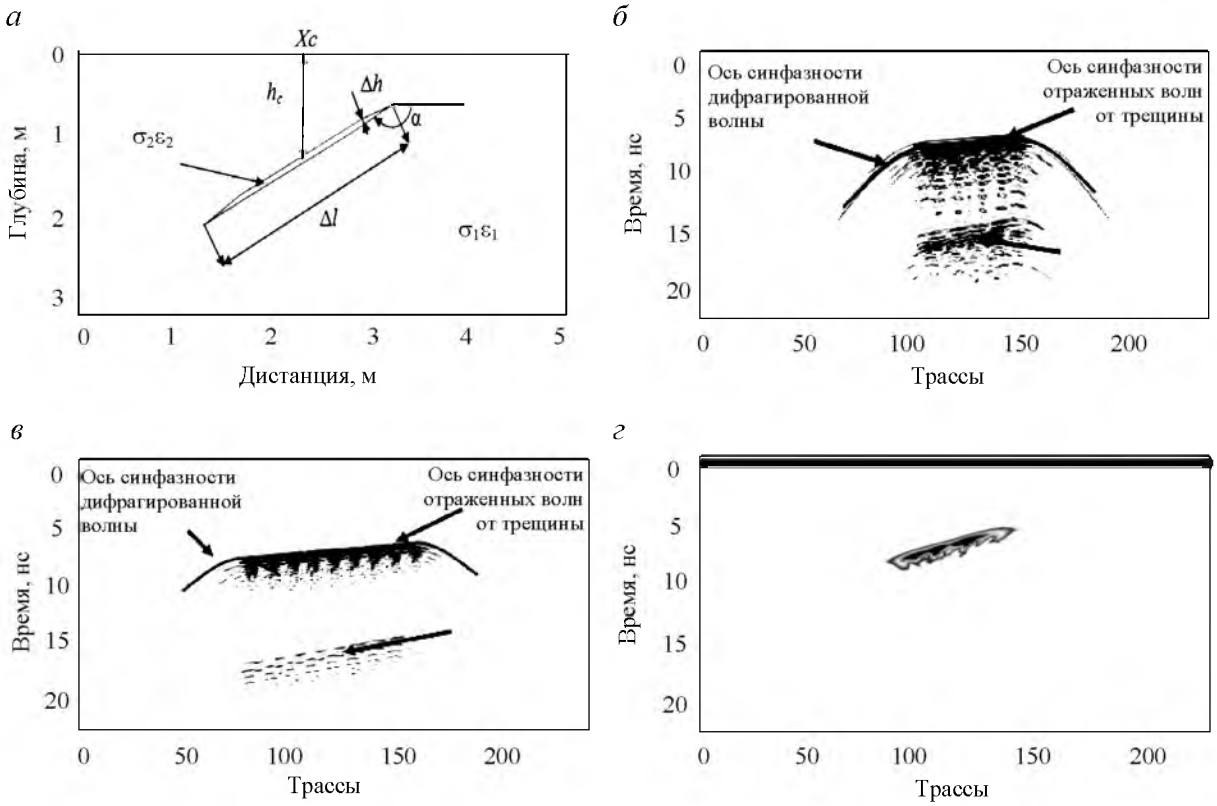


Рис.1. Параметрическая модель (*а*), теоретические радарограммы трещины, заполненной воздухом (*б*) и водой (*в*), энергограмма (*г*)

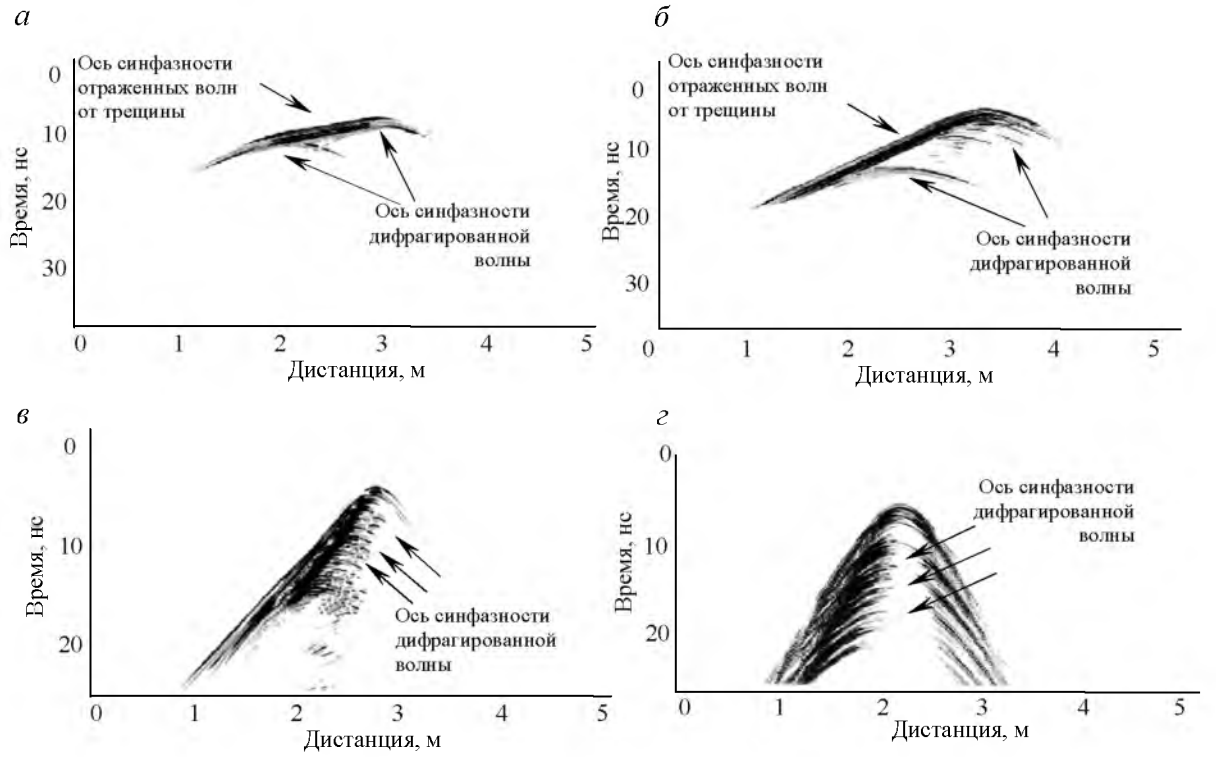


Рис. 2. Теоретические радарограммы трещин с углами падения α: 10°(*а*), 30°(*б*), 60°(*в*), 80°(*г*)

волновое поле распадается на серию квазигипербол. Оценить по этой сложной интерференционной волновой картине параметры трещин практически невозможно.

В основу изучения влияния системы трещин выветривания на волновое электромагнитное поле положены вероятностные модели. В них задается случайное распределение отдельных трещин, для описания которых используются параметры средних значений трещиноватости. На практике эти параметры определяются в результате статистической обработки геологических исследований трещиноватости скальных массивов. Наиболее распространены обобщенные показатели трещиноватости пород, к которым относятся модули трещиноватости и коэффициент трещинной пустотности $k_{тр}$.

Л.И.Нейштадт предложила следующую классификацию пород по степени трещиноватости [2]: 1) слаботрещиноватые ($k_{тр} < 2$ %); 2) среднетрещиноватые ($k_{тр} = 2 \div 5$ %); 3) сильнотрещиноватые ($k_{тр}$ = от 5÷10 %); 4) очень сильнотрещиноватые ($k_{тр} = 10 \div 20$ %) и исключительно сильнотрещиноватые ($k_{тр} > 20$ %).

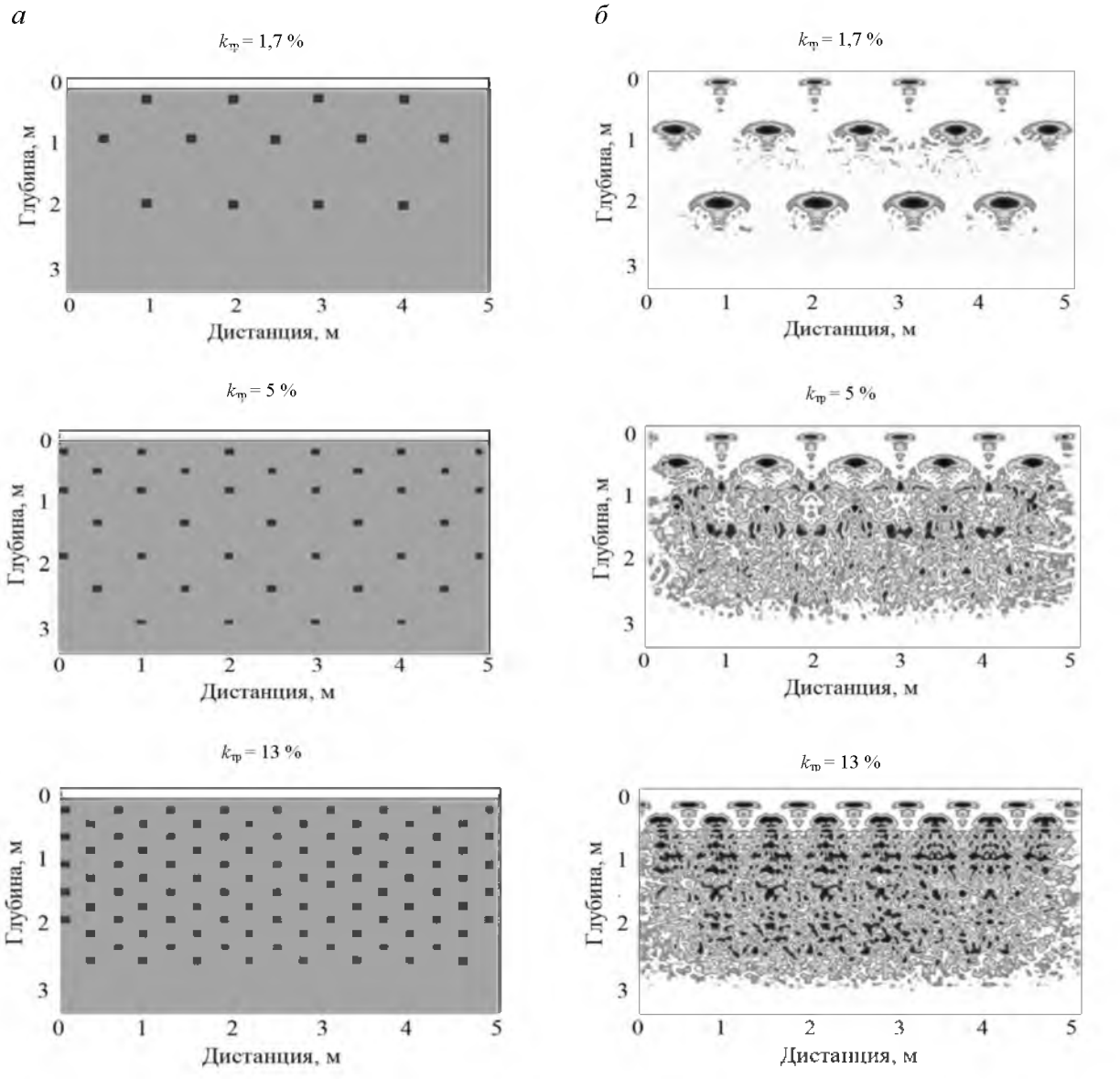


Рис. 3. Вероятностные модели системы трещин выветривания с заданными параметрами коэффициента трещинной пустотности скального массива $k_{тр}$ (*а*) и соответствующие им теоретические энергограммы (*б*)

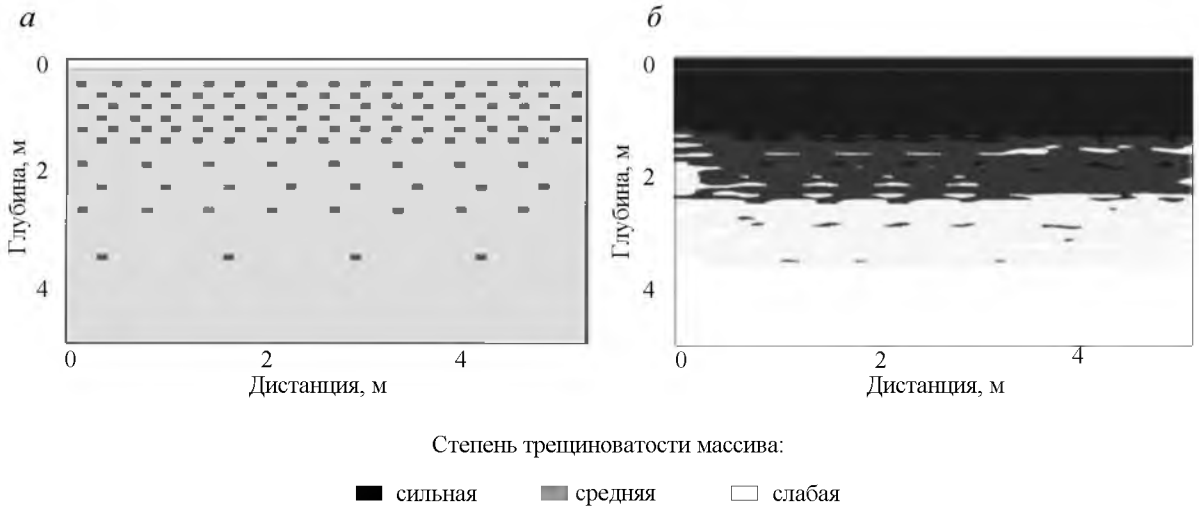


Рис.4. Вероятностная трехслойная модель системы трещин выветривания, значение $k_{тр}$ в слоях которой убывает с глубиной (*а*), и соответствующая ей теоретическая энергограмма (*б*)

В основу изучения особенностей волновых электромагнитных полей от системы трещин, характеризующихся различными значениями $k_{тр}$, положены вероятностные электрофизические модели параллельных субгоризонтальных водозаполненных трещин (рис.2, *б* и *г*). При построении модели использовались следующие параметры регистрации: центральная частота зондирующих импульсов 700 МГц, база антенны 20 см, время регистрации 40 нс, интервал трасс по профилю 2 см.

Анализ теоретических энергограмм (рис.3) показал, что при высокой степени трещиноватости скальных пород выделение полезных отраженных и дифрагированных волн от отдельных трещин фактически невозможно в силу сложной интерференционной картины волнового поля. Поле в этих условиях следует рассматривать в качестве диссипативного, обусловленного рассеянием его энергии в результате отражений и дифракции на отдельных трещинах. Для оценки степени трещиноватости по наблюдаемому диссипативному электромагнитному полю целесообразно применить процедуры статистической обработки энергограмм, аналогичные тем, которые широко используются при геологических исследованиях трещиноватого скального массива. Процедуры сводятся к обработке энергограмм методом скользящего среднего в 2D-информационном окне.

Применение этого метода позволяет получить осредненную энергограмму, на которой локализуются области, характеризующиеся различной энергией диссипативных электромагнитных волн. Следует отметить, что при вычислениях следует учесть затухание волн, связанное со сферическим расхождением.

В качестве примера, иллюстрирующего эффективность предлагаемой обработки, приведена осредненная энергограмма трехслойной модели трещиноватого массива, в которой значение $k_{тр}$ слоев уменьшается с глубиной (рис.4). Зоны с одинаковыми значениями средних значений мгновенной амплитуды $\bar{A}_{ср}$ на энергограмме отражают горизонтально слоистую структуру разреза. Уменьшение значений $\bar{A}_{ср}$ в этих слоях соответствует следующим градациям степени трещиноватости: сильная, средняя и слабая степень (рис.4, *б*).

На основании результатов математического моделирования получены зависимости амплитуды волнового поля $\bar{A}_{ср}$ от значений коэффициента $k_{тр}$ для трещин, заполненных водой и воздухом (рис.5). Зависимости резко изменяются в пределах областей I и II и выходят на асимптоту в пределах области IV. Характер зависимостей позволяет заключить, что по изменениям величины $\bar{A}_{ср}$ на энергограммах должны отчетливо выделяться слабо-, средне- и сильнотрещиноватые породы.

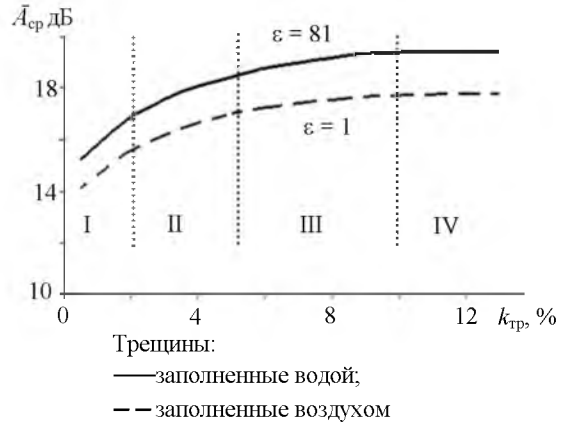


Рис.5. Зависимость осредненных значений мгновенной амплитуды $\bar{A}_{ср}$ от коэффициента $k_{тр}$ пород следующих градаций:

I – слаботрещиноватые; II – среднетрещиноватые; III – сильнотрещиноватые; IV – очень сильнотрещиноватые

Отличия между сильнотрещиноватыми и очень сильнотрещиноватыми породами незначительны и не могут быть выделены на энергограммах по значениям $\bar{A}_{ср}$.

Результаты математического моделирования позволяют заключить, что предлагаемая методика обработки и интерпретации данных георадиолокации дает возможность получить полуколичественную оценку степени трещиноватости скального массива на основе выделения трех градаций: I – слаботрещиноватые; II – среднетрещиноватые; III – сильнотрещиноватые.

Возможности практического применения данной методики иллюстрируют результаты полевых георадиолокационных исследований, выполненных на скальных массивах гранитов Карельского перешейка и Кольского полуострова.

Гранитный массив месторождения облицовочного камня «Ладожское» разбит сетью тектонических трещин. Георадарная съемка, выполненная с антенной системой 700 МГц, обеспечила зондирование скального массива на глубину 10 м. На энергограммах отчетливо проявились отдельные субгоризонтальные и наклонные трещины (рис.6, *а*). Георадиолокационный образ скального массива позволяет судить о пространственном размещении как отдельных трещин различных порядков, так и пространственной сети трещин исследуемого массива, которая определяет характер расчлененности его на разновеликие структурные блоки. Данные метода георадиолокации характеризуют естественную блочность массива и позволяют оптимизировать систему разработки месторождения. Под блочностью пород понимается средний размер ребра блока пород, образованного трещинами одного порядка.

На Кольском полуострове метод георадиолокации позволяет изучить изменение степени трещиноватости с глубиной. Для

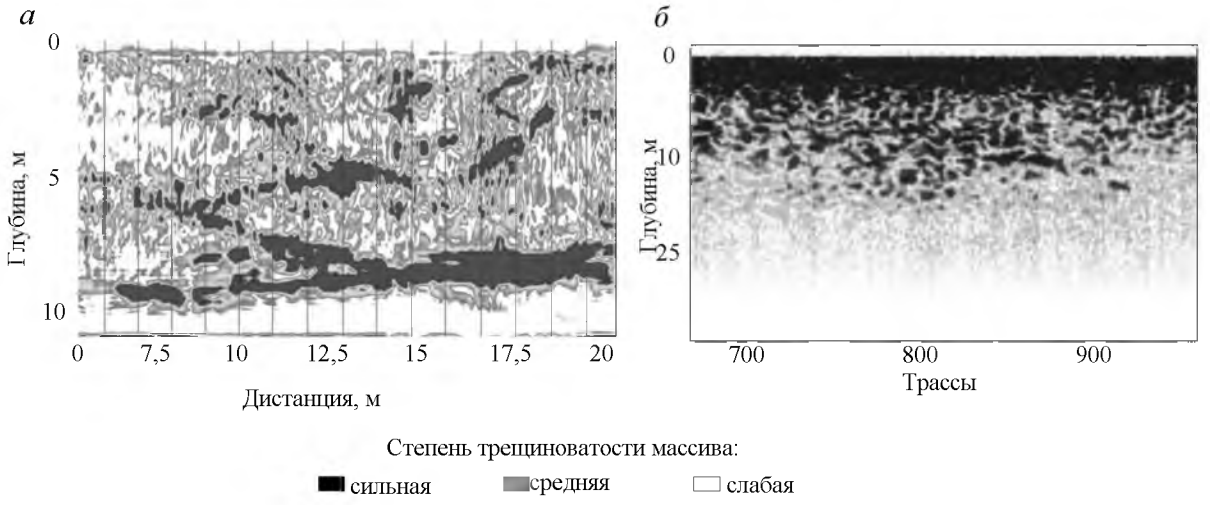


Рис.6. Экспериментальные энергограммы тектонических трещин месторождения облицовочного камня «Ладожское» (*а*) и трещин выветривания скального массива Кольского полуострова (*б*)

решения этой задачи георадиолокационное зондирование выполняется на глубину до 25 м с использованием антенной системы, работающей на центральной частоте 150 МГц. На энергограмме, полученной с помощью предлагаемой методики обработки и интерпретации данных георадиолокации, отчетливо прослеживается вертикальная зональность степени трещиноватости массива гранитов. На основании метода георадиолокации выделены три градации степени трещиноватости массива.

Георадиолокация является активно развивающимся и перспективным методом, способным повысить эффективность изучения скальных массивов. Результаты математического моделирования георадиолокационных полей подтвердили целесообразность применения метода георадиолокации для исследования степени трещиноватости в скальных массивах. Результаты моделирования позволяют обосновать методику проведения динамического анализа волновых электромагнитных полей наряду с классическим кинематическим анализом. Анализ статистических характеристик мгновенных амплитуд электромагнитных волн позволяет дать оценку степени трещиноватости пород.

Не вызывает сомнения и то, что использование георадиолокационных технологий при изучении трещиноватости скальных массивов обладает большими перспективами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бака Н.Т.* Облицовочный камень. Геолого-промышленная и технологическая оценка месторождений: Справочник / Н.Т.Бака, И.В.Ильченко. М., 1992.

2. *Нейштадт Л.И.* Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях. М. – Л., 1957.

3. *Старовойтов А.В.* Интерпретация георадиолокационных данных: Учебное пособие. М., 2008.

4. *Финкельштейн М.И.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И.Финкельштейн, В.А.Кутев, В.П.Золотарев. М., 1986.

REFERENCES

1. *Baka N.T., Il'chenko I.V.* Facing stone. Geological-industry and technological measure field: Dictionary. Moscow, 1992.

2. *Newstadt L.I.* Methods of geological researching fracturing rock at engineering-geological research. Moscow – Leningrad, 1957.

3. *Starovoitov A.V.* Interpretation georadar data: Manual. Moscow, 2008.

4. *Finkel'stein M.I., Kutev V.A., Zolotarev V.P.* Application the radar penetrating sounding at engineering geology. Moscow, 1986.