Катаев В.Н., Челпанова Т.А. Характер плотностного распределения трещин в пласте осадочных горных пород // Вестник Пермского университета. Геология. 1999. Вып. 3. С. 194-206.

Вестник Пермского университета

1999 Геология Вып.3

УДК 551.44:624.131

# ХАРАКТЕР ПЛОТНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ПЛАСТЕ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

В.Н. Катаев, Т.А. Челпанова

Рассмотрены современные представления о зависимостях плотностного распределения трещин в осадочных горных породах. Приведены варианты графической интерпретации зависимостей расстояний между трещинами и мощностью пласта, используемые в отечественной и зарубежной практике анализа трещинной раздробленности. Приведены результаты изучения распределения плотности тектонических трещин и соответствующего распределения карстовых и эрозионных форм в дислоцированных известняках некоторых районов Западного Урала.

*Состояние проблемы*. Исходя из принципа отражения последовательности образования трещин в массивах горных пород целесообразно придерживаться следующего наиболее распространенного генетического деления этого типа дизъюнктивов на литогенетические, тектонические, экзогенные. Трещины каждого из перечисленных классов обеспечивают водопроницаемость массива и как следствие развитие карста, но их роль неоднозначна во времени и в пространстве - на различных этапах развития массива и в различных гидродинамических зонах.

Традиционно считается, что большее значение для развития карста в зоне активного водообмена имеют тектонические трещины в силу их повсеместного распространения в регионах различного геоструктурного плана и по стратиграфическому разрезу от докембрия до четвертичных отложений.

Согласно наиболее простому делению, предложенному В.В. Белоусовым [2], вся совокупность тектонических трещин по отношению к вмещающим пластам может быть представлена двумя типами: «внутрислойные» и «секущие». Внутрислойные, не выходящие за пределы конкретного слоя пород, образуют фоновую трещиноватость в осадочных породах платформ и складчатых областей. Трещины данного типа характеризуются широким региональным распространением. Их ориентировка (например, для Восточно-Европейской платформы меридионально-широтная и диагональная) остается неизменной и не зависящей от наличия пликативных дислокаций. Лучшее выражение такие трещины получили в плотных слоях осадочного чехла. Внутрислойные трещины по своим характеристикам ассоциируются с «планетарными» или «общими» трещинами, вы-

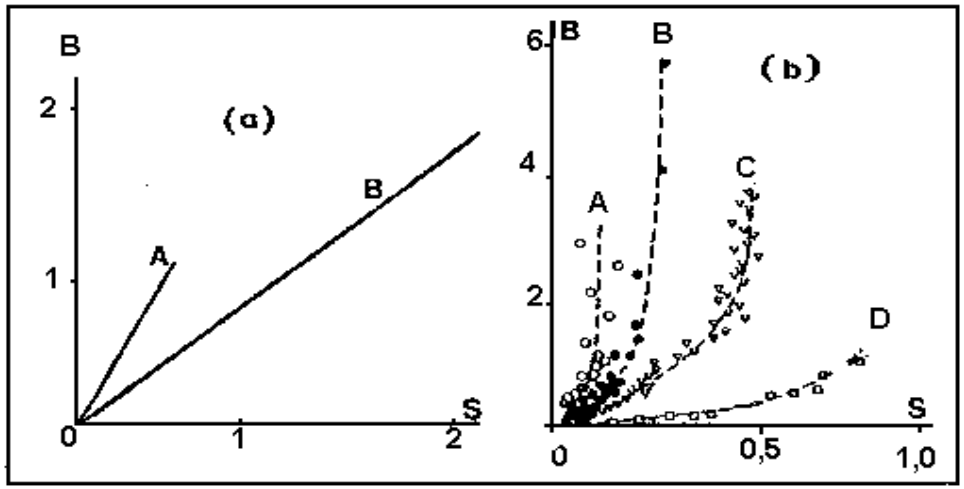


Рис.1.Графики соотношения расстояний между трещинами (***S***,м) и толщиной слоя (***B***,м) по: (a) А.А. Богданову [3], И.В. Кирилловой [14], A-для известняков, B-песчаников; (b) по F.L. Ladeira, N.J. Price [15] для граувакков Великобритании: A-с переслаиванием <5см, B-с переслаиванием >5см, C-граувакков Португалии, D-известняков Португалии

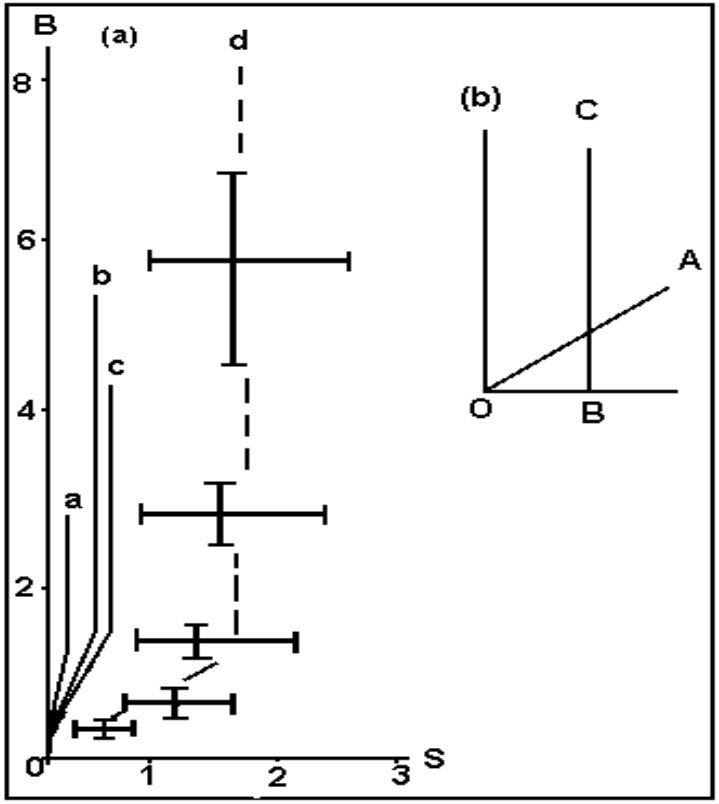


Рис.2. (a) Сравнительные диаграммы соотношения расстояний между трещинами (***S***) и толщиной слоя (***B***) в метрах: a, b, c по данным, представленным на рис.1; d-для известняков по данным Mc Quillan [16]. (b) Обобщенная схема типов линейных соотношений ***S*** и ***B***. Отрезки на диаграмме d-спектры вариаций ***S*** и ***B*** в пунктах фиксации трещин

деляемыми М.В. Рацом и С.Н. Чернышевым [10]. По механизму образования данный тип относится к трещинам отрыва, возникшим в условиях растяжения пластов под влиянием тектонического стресса и нагрузки вышележащих толщ горных пород.

Интенсивность внутрислойной трещиноватости является функцией мощности, литологического состава и механической прочности пород слоя, его деформированности. Первые исследования, посвященные данному вопросу были проведены А.А. Богдановым [3], И.В. Кирилловой [14], Г.А. Смирновым [11]. Результаты исследований, представленные на рис. 1(а), свидетельствуют о том, что

- литологический фактор определяет степень раздробленности пластов (известняки раздроблены менее интенсивно, нежели песчаники аналогичной мощности);
- отношение между толщиной пласта и расстоянием между трещинами в нем выражается следующей линейной зависимостью:

$$S = K \cdot B \quad (1),$$

где $B$-толщина пласта, $K$-константа, отражающая литологию пласта.

Установлено, что среднее расстояние между трещинами примерно равняется двум мощностям пласта, в которых они развиты. В зарубежной литературе, во многом благодаря исследованиям N.J. Price [17], D.W. Hobbs [13], G.M. Sowers [18], линейность данной зависимости является широко используемой. В отечественной литературе М.В. Рацом [9], М.В. Рацом и С.Н. Чернышевым [10] на примере песчаников терригенной толщи ордовика Центрального Казахстана было установлено, что расстояние между трещинами пропорционально корню квадратному из мощности слоя.

В связи с тем, что достаточно точное определение генезиса трещин в полевых условиях затруднительно, нет полной уверенности, что эти зависимости получены например только для внутрислойных тектонических трещин. Необходимо также отметить, что полевые исследования трещиноватости, результатами которых явилось линейное выражение зависимости расстояний между трещинами и толщиной пласта, проводились в наслоениях не превышающих по мощностям 1.5м.

Исходя из обобщений F.L. Ladeira и N.J. Price [15], по материалам исследований трещин (без указания на их генетический тип) в граувакках и известняках Португалии, Ирана, Великобритании, очевидны следующие выводы (рис.1(b); 2):

* расстояния между трещинами в практически любых по литологии слоях имеет линейную зависимость от толщины данного слоя, если она не превышает 1.0-1.5м;
* расстояния между трещинами приближаются к постоянной величине в однородных по литологии слоях, превышающих по мощности 1.5-2.0м;

* существование двух типов линейных отношений расстояний между трещинами и толщиной слоев, в которых они развиты, определяются различными механизмами образования трещин.

Первый тип отношений (показан на диаграмме рис.2(b), линия OA) отражает линейную зависимость, установленную исследованиями, результаты которых опубликованы в работах упомянутых выше авторов. Расстояние между трещинами отрыва определено влиянием сил сцепления по поверхностям соседних слоев, сложенных относительно пластичными и относительно хрупкими породами. Мощности слоев не превышают 2.0м. Деформации растяжения, обусловившие появление трещин отрыва, неоднородны в различных по литолого-механическим свойствам слоях и вызваны давлением вышележащих толщ.

Второй тип отношений определяется литологией и не зависит от толщины слоя (рис.2(b), линия BC). По предположению F.L. Ladeira и N.J. Price [15], в слоях мощностью 2.0-12.0м трещины «отрыва» и «отрыва-скола» образуются в результате «гидравлического механизма трещинообразования». Соотношение трещин отрыва и трещин отрыва-скола в пластах, количественно не определено. Трещины отрыва развиваются в пласте в том случае, когда давление флюида превышает всестороннее давление - внешнее давление на пласт. В маломощных наслоениях, где степень растяжения контролируется силой сцепления по поверхностям смежных слоев, «гидравлический механизм трещинообразования» играет второстепенную роль.

Применительно к решению карстологических задач важную роль играет показатель раскрытости трещин. Раскрытость трещин тесно связана с их плотностным распределением в пласте и также зависит от его мощности. W. Dreybrodt [12] приводит следующую зависимость раскрытости трещин от мощности пласта:
$\log d = A + C \log B$ (2),

где $d$-раскрытость трещин, $B$-мощность пласта, $A$ и $C$-константы.

Из пропорциональности расстояний между трещинами $S$ и мощностью пласта $B$, получаем $\log d = A + C \log S$ (3).

Из приведенных соотношений следует, что чем толще пласт, тем меньшее количество трещин имеет относительно большую раскрытость и наоборот. Следовательно, среди множества трещин в растворимом пласте только несколько обладают карстогенетическими свойствами.

Представленные зависимости расстояний между внутрислойными трещинами и их раскрытости от литологии и мощности слоя являются фундаментальными. Вместе с тем, приведенные соотношения не учитывают изменений раскрытости и плотности трещин в пласте в результате его деформаций и предназначены для применения в условиях относительно равномерного распределения трещин. Естественно, что проявление данных фундаментальных зависимостей затушевывается в той степени, в какой деформирован пласт. На относительно равномерное по пласту, фоновое распределение внутрислойных трещин, накладывается тре-

щиноватость, образованная собственно тектоническими, секущими трещинами, что наиболее ярко проявляется в пределах пород пликативных дислокаций. Здесь, плотностое распределение трещин («трещины изгиба» по В.В. Белоусову [2]; «соскладчатые трещины» по Л.И. Нейштадт и И.А. Пирогову [8]) зонально, что определяется степенью деформируемости пород относительно элементов пликативной структуры [5, 6].

В общем случае, при визуальной съемке трещин в пласте карстующихся пород (вне зависимости от литологии) исследователь фиксирует чередование участков с относительно густой и относительно разряженной решеткой трещин. Протяженность участков с различной плотностью трещин по фронту обнажения меняется в зависимости от принадлежности исследуемого интервала пласта к тому или иному элементу складки. В идеальном случае протяженность участков, характеризующихся различной плотностью трещин, совпадает. Периодичность изменений расстояний между трещинами для идеального случая можно представить в следующем виде

$$S = \frac{1}{2}\left[ S_{\max} + S_{\min} + (S_{\max} - S_{\min}) \cos 2\pi \frac{x}{t} \right] \quad (4),$$

где $S$-расстояние между соседними трещинами ($S_{max}$ и $S_{min}$ соответственно максимальное и минимальное наблюденные расстояния), $x$-протяженность интервала съемки трещин, $t$-ширина зон трещин с различной интенсивностью (рис.3).

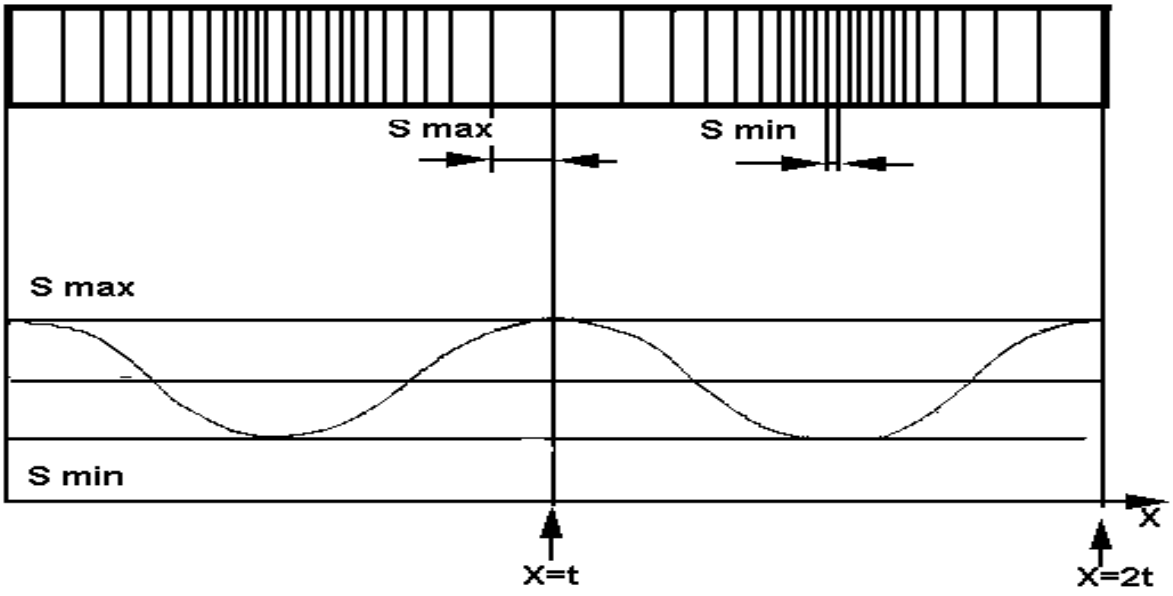


Рис.3.Схема к расчету расстояний между трещинами при их идеальном периодичном распределении

В реальных условиях, распределение плотностей трещин на различных элементах складок более сложно, поскольку оно отражает влияние групп факторов иерархичного подчинения: I - связанных с общим региональным деформаци-

онным полем, II - связанных с деформационым полем конкретной складки и III - отражающих деформационное поле элемента складчатой дислокации.

Вопрос о плотностном распределении трещин в интенсивно дислоцированных породах остается открытым. Общие закономерности распределения внутрислойной трещиноватости (линейные отношения расстояний между трещинами и толщиной пласта), установленные в конце 40-х годов и подтвержденные в 60-х-70-х годах отечественными и зарубежными учеными, применимы для фоновой (планетарной) трещиноватости. В пределах складчатых структур распределение тектонических трещин в породах зонально и контролируется степенью их деформированности относительно элементов складки.

*Расчет плотностного распределения тектонических трещин.* Вероятно, одним из первых отечественных ученых, кто указал на динамичность изменения трещиноватости в горных породах был В.А. Апродов [1]. Основываясь на изучении закономерностей распределения трещин сжатия в интрузивных телах им было высказано предположение о волновой природе плотностного распределения трещиноватости. В.А. Апродовым было установлено, что густота трещин от центральных частей интрузии к ее контактам изменяется периодично. Данное явление было объяснено эффектом отражения упругих волн от контактовых поверхностей интрузии и появлением «стоячих волн», в кучностях которых развивается более интенсивная трещиноватость, а между ними сохраняется относительно монолитная порода.

Любые данные, полученные в результате полевых наблюдений и имеющие цифровое выражение могут быть обработаны с помощью методов математической статистики. В процессе геометро-статистических обобщений можно получить различные характеристики изменчивости параметров, например в виде графиков линейных изменений параметра по профилю исследований, корреляционных функций или энергетических спектров. В настоящее время геология располагает достаточно большим арсеналом методов выявления периодичности тех или иных параметров геологических объектов. В этих методах используются различные преобразования исходного ряда наблюдений, позволяющие усилить роль периодической составляющей. Как отмечают А.Б. Каждан и О.И. Гуськов [4] наиболее приемлемыми из них является метод, основанный на оценке спектральной плотности дисперсии при равном расстоянии $r$ между точками наблюдения, получаемой в результате разложения в ряд Фурье корреляционной функции

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} K_x(r)\cos\omega r dr \quad (5).$$

При фиксации тектонических трещин по линии обнажения горных пород расстояния между точками наблюдений обычно не равны. Сеть наблюдений, как правило дискретна. В этом случае спектральная плотность дисперсии $S_x(\omega)$ заменяется линейчатым энергетическим спектром. Значения энергетического спектра

$d_k$ показывают, каким образом общая дисперсия признака распределяется между отдельными гармониками.

Энергетический спектр случайной полигармонической последовательности, рассчитанный по ограниченному количеству наблюдений, представляет собой сочетание резких пиков на частотах ($\omega$), соответствующих закономерным гармоническим колебаниям, с относительно постоянными для всех других частот значениями $d_k$, обусловленными случайной составляющей. Количество пиков соответствует числу гармоник $\nu$, а их высота равна половине квадрата амплитуды гармоники данной частоты: $d_k = \frac{1}{2} A_k^2$.

Величина периодов закономерных колебаний определяется по формуле

$$T_k = (N-1)r / \omega_k \quad (6),$$

где *N*-общее количество замеров по профилю; *r*-расстояние между соседними пунктами наблюдений; $\omega_k$-частота гармоники.

Значения $d_k$, обусловленные случайной составляющей, имеют бета-распределение Фишера, плотность которого задается формулой $P(x) = (n-1)(1-x)^{n-2}$, где *n*-общее число значений спектра.

Математическое ожидание и стандартное отклонение этого распределения соответственно равны

$$\bar{d}_k = \frac{1}{n} \quad (7); \quad \sigma_d = \sqrt{\frac{n-1}{n^2(n+1)}} \quad (8).$$

Эти формулы используются для проверки гипотезы о принадлежности пиков энергетического спектра к случайным флуктуациям. Пики, превышающие предельное значение (например, $\bar{d}_k + 3\sigma_d = d_k'$ при доверительной вероятности 99%), объясняются наличием гармоник и могут быть использованы для оценки периодов и амплитуд гармонической составляющей. Доля закономерной составляющей в общей дисперсии признака определяется путем суммирования аномальных значений спектра, из которого предварительно вычитается исправленное значение фона, определяемое по формуле

$$\bar{d}_{k(\text{испр})} = \frac{1 - \sum_1^m d_k'}{n-m} \quad (9),$$

где $d_k'$-сумма аномальных значений спектра; *m*-количество аномальных значений спектра.

*Результаты обработки фактических данных.* В качестве примера одного из вариантов оценки периодичности плотностного распределения тектонических трещин, приведем результаты графической интерпретации данных съемки трещин в пласте карбонатных пород на участке «Большая Велсовская пещера» (Западный склон Северного Урала, среднее течение р.Вишеры, нижний силур, нижний лландовери).

За исходную функцию были приняты расстояния между тектоническими трещинами, зафиксированными в обнажении доломитистых известняков в береговом обрыве среднего течения р.Вишеры.

Обработка и интерпретация данных картирования тектонических трещин проведена с учетом методических принципов, во многом разработанных В.Ф. Мягковым [7] для решения геологоразведочных задач методами математической статистики, а также с использованием сетевого варианта Windows'95 и приложений Excel и Grapher для ПЭВМ.

Для осреднения функции изменений линейной плотности трещин, полученной в результате фиксации расстояний между трещинами, был использован метод функционального полинома. Полином создавался подборкой, основанной на базовом уравнении

$$U = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_n x^n \quad (10).$$

При выборе полинома можно устанавливать его степень от 0 до 10. В конечном итоге, было выбрано полиномиальное распределение $10^{\underline{й}}$ степени, как наиболее близко, в графическом отношении, отражающее характер вариаций исходной функции (рис.4).

На основе полигармонической последовательности исходной функции был построен и проанализирован энергетический спектр амплитуд плотности трещин. На графике полиномиального осреднения и на графике спектра амплитуд плотности трещин отчетливо выделяются пять пиков (гармоник) на соответствующих пикетах и соответствующих частотах (в скобках): 24м (1); 240м (6); 560м (13.5); 840м (21.5) и 1064м (26.5).

Фоновое значение спектра амплитуд $\overline{d_k}$=0.2, а стандартное отклонение значений спектра от фонового при условии отсутствия закономерной составляющей будет $\sigma_d$=0.16. Минимальное аномальное значение спектра ($d_k^{'}$) при доверительной вероятности 99% составит 0.68. Сумма аномальных значений спектра после вычитания из них исправленного фона составляет 0.48. Это означает, что чуть менее половины дисперсии исходной функции обусловлено закономерными колебаниями.

Минимальное аномальное значение спектра (0.68) превышено в двух случаях: на частотах 6 и 21.5 (соответственно 0.91 и 0.72); на частоте 1 значение спектра выше фонового, но ниже минимального аномального и составляет 0.45. Иными словами, большая часть значений спектра амплитуд плотности трещин по

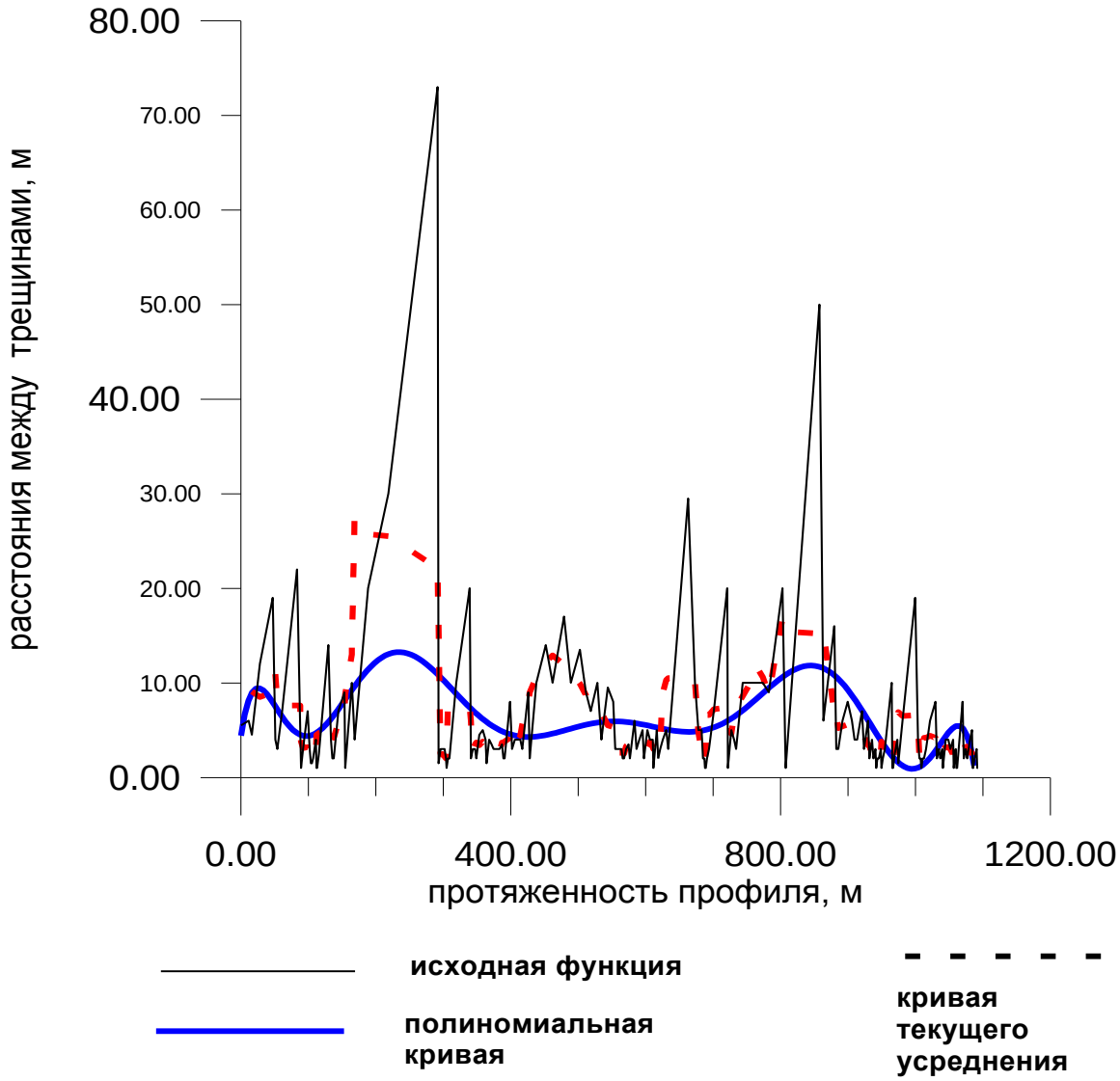


Рис.4.Графики осреднения первичных данных по профилю на участке Большая Велсовская пещера

профилю изменяются в пределах близких к фоновым.

Аномальные пики плотностей трещин на частотах 6 и 21.5 соответствуют колебаниям с периодами 8.6м и 2.2м. Пики фонового распределения плотностей трещин соответствуют колебаниям с периодами 0.8-1.7м.

На пикетах 240 и 840м, которым соответствуют аномальные пики плотностей трещин, зафиксированы устья относительно крупных карстово-эрозионных логов, шириной более 20м. Участки профиля, занятые устьями логов, задернованы. Замеры трещин единичны. Эти лога транслокальные, протягивающиеся за пределы пещерного поля. Логично предположить, что данные лога трассируют крупные дизъюнктивы деформационного поля Кожимо-Вишерской структуры, в пределах которой расположено пещерное поле. Пик на частоте 1 (24м по профи-

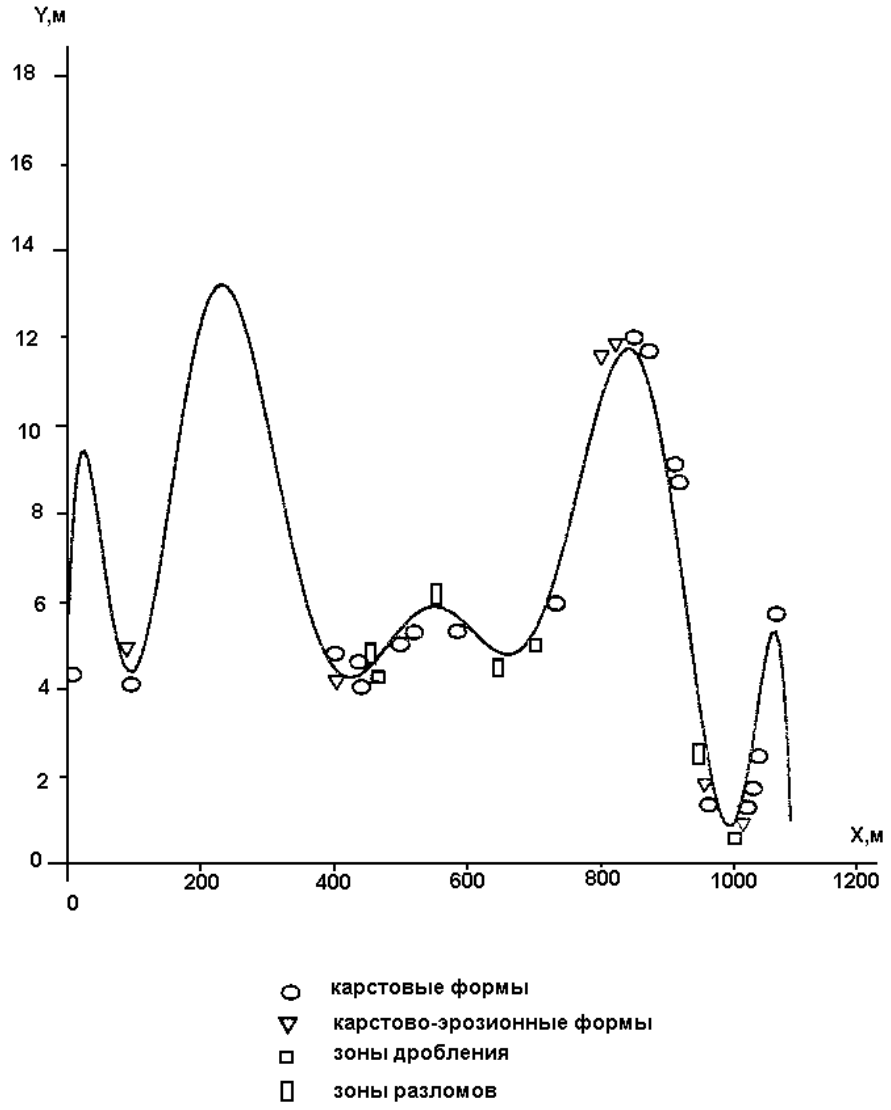


Рис.5.График соотношения распределения плотности трещин по профилю на участке Большая Велсовская пещера, карстовых, карстово-эрозионных и дизъюнктивных форм

лю) соответствует устью карстово-эрозионного лога, параметры которого близки к параметрам транслокальных логов.

Наибольшее развитие формы карста получили в интервале фоновых значений плотностей трещин, в интервале колебаний распределения исходной функции с периодом 0.8-1.7м, что соответствует участкам с зафиксированными расстояниями между трещинами 4-7м - средними значениями спектра распределения (рис.5, табл.).

Таблица

**Соответствие интервалов профиля с различной степенью раздробленности, карстовых, карстово-эрозионных и дизъюнктивных форм (участок Большая Велсовская пещера)**

| Расстояние между трещинами, м | Формы | | |
|---|---|---|---|
| | **карстовые** | **карстово-эрозионные** | **дизъюнктивные** |
| 1-3 | Ниши выщелачивания; каналы, диаметром до 0,4м; второй вход (над урезом р.Вишеры) Большой Велсовской пещеры | Эрозионно-карстовые лога с шириной в устьевой части 5-10м | Зоны дробления; трещины, расширенные дроблением бортов до 2м |
| 4-7 | Ямки и канавки выщелачивания по бортам субвертикальных тектонических трещин; гроты высотой 0,5-1,5м со следами временных водотоков; ниши выщелачивания по трещинам напластования | Полуцирки; врезы; устья логов шириной 10-20м | Плоскости смещения с амплитудами до 0,3м; трещины , расширенные дроблением бортов до 0,2-1,0м |
| 8-16 | Гроты, высотой до 0,5м; ниши выщелачивания по трещинам напластования | Устья логов шириной свыше 20м; карстово-эрозионные полуцирки | Трещины, расширенные дроблением бортов до 1,0м |

*Выводы.* Анализ составляющих изменчивости плотностного распределения трещин в пределах карстующихся дислоцированных горных пород позволяет выделять разноуровенные элементы неоднородности в строении карстующихся массивов и прогнозировать наиболее вероятные участки заложения тех или иных карстовых, карстово-эрозионных , дизъюнктивных форм в соответствии с состоянием раздробленности массива.

*Библиографический список*

1.Апродов В.А. Геологическое картирование / М.:Госгеолиздат, 1952. 371с.

2.Белоусов В.В. Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. М.: АН СССР, 1952. N7(144). 145с.

3.Богданов А.А. Интенсивность кливажа относительно мощностей слоев // Советская геология, 1947. N16.

4.Каждан А.Б., Гуськов О.И. Математические методы в геологии: Учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 251с.

5.Калачева В.Н., Кноринг Л.Д. Закономерности развития трещиноватости на структурах различного типа (в складчатых и платформенных областях) // Трещинные коллекторы нефти и газа и методы их изучения. Л.: Недра, 1965. Вып. 3, 242. С.113-156.

6.Катаев В.Н., Печеркин А.И., Махорин А.А. Изучение закарстованных и трещиноватых зон в инженерном карстоведении (на примере горно-складчатых областей): Учебное пособие по спецкурсу / Перм.ун-т. Пермь, 1987. 88с.

7.Мягков В.Ф. Математические методы в геологии (раздел «Геометризация и анализ геологических полей месторождений полезных ископаемых»): Методическая разработка / Свердловский горный ин-т. Свердловск, 1984. 44с.

8.Нейштадт Л.И., Пирогов И.А. Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М.: Энергия, 1969. 248с.

9.Рац М.В. К вопросу о зависимости густоты трещин от мощности слоя // Доклады АН СССР, 1962. Т.144, N3. С.622-625.

10.Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 160с.

11.Смирнов Г.А. О некоторых закономерностях в развитии трещин отдельностей // Доклады АН СССР, сер. геол., 1949. N3. С.99-101.

12.Dreybrodt W. Processes in Karst Systems. Physics, Chemistry,and Geology. Berlin Heide Iberg: Springer-Verlag. Springer Series in Physical Environment, 1988. 288p.

13.Hobbs D.W. The formation of tension joints in sedimentary rocks: an explanation // Geol.Mag, 1967. N104. P.550-556.

14.Kirillova I.V. Some problems of the mechanics of folding // Trans. Geofian, 1949. N 16: 116.

15.Ladeira F.L., Price N.J. Relationship between fracture spacing and bed thickness // Journal of Structural Geology. U.K., 1981. Vol.3, N2. P.179-183.

16.Mc Quillan H. Small-scale fracture density in Asmari Formation of Southwest Iran and its relation to bed thickness and structural setting // Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 1973. N57. P.2367-2385.

17.Price N.J. Fault and Joint Development in Brittle and Semi-brittle Rock. Oxford: Pergamon Press, 1966.

18.Sowers G.M. Theory of spacing of extension fracture // Engng. Geol. Case Hist, 1973. N9. P.27-53.

Kataev V.N., Chelpanova T.A.

CHARACTER DENCE DISTRIBUTION OF THE FISSURES IN LAYER OF ROCK

The contemporary conceptions about dence distribution of the fissures in sedimentary rock layer were considered. The variants of graphic interpretation of the dependences of the intervals between fissures and thickness of the layer which use by home and foreigh analisis of fissuring were brought up. The graphic results of investigation of dence tectonic fissure distribution in limestone layer were suggested.