

УДК 622 + 624.131.1
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2023



К вопросу инженерно-геологического районирования территорий в пределах локальных тектонических структур

Ш.Х. Гайнанов

Пермский государственный национальный исследовательский университет (Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15)

On the Question of Engineering and Geological Zoning of Territories within Local Tectonic Structures

Sharibzan Kh. Gainanov

Perm State National Research University (15 Bukireva st., Perm, 614068, Russian Federation)

Получена / Received: 15.09.2022. Принята / Accepted: 19.12.2022. Опубликовано / Published: 31.05.2023

Ключевые слова:

локальные тектонические структуры, тектоническая трещиноватость, напряжения, деформации, строение пород, свойства пород, критерии при выделении ослабленных зон массива, гипергенез, экзогенные процессы.

Актуальность исследований заключается в подходе к оценке инженерно-геологических условий в пределах локальных тектонических структур и их роли в формировании свойств пород и состояния массивов, ими сложенных. Постановка вопроса относительно пород красноцветной терригенной формации как отдельного объекта инженерно-геологических исследований позволяет учитывать особенности истории и механизма развития локальных структур, а также их влияние на реакцию пород при этом. Особое внимание уделяется роли тектонической трещиноватости, как следствию механизма развития локальных структур и ее влиянию на активизацию процессов гипергенеза.

Осуществлен анализ поведения пород в ходе развития локальных структур и реакции массива на изменение состояния пород и активизацию процессов гипергенеза, что, в свою очередь, определяет инженерно-геологическую ситуацию на текущий момент. Особое внимание уделяется оценке тектонической трещиноватости, выделению ослабленных зон и критериям, подтверждающих корректность их выделения.

Методы, применяемые при решении поставленных задач, сводились к комплексному изучению локальных структур: изучение истории их развития, размеров, амплитуды поднятия фундамента, инструментальная съемка трещиноватости в обнажениях с последующим построением карты трещиноватости, отбор образцов, лабораторные исследования строения и свойств пород, фиксация экзогенных процессов в пределах структуры.

Результатом исследований явились установленные зависимости влияния тектонической трещиноватости на состояние пород на трех уровнях: микроуровень (реакция минералов слагающих пород на уровне кристаллической решетки в виде возникших дефектов); мезоуровень (изменения физико-механических свойств пород); макроуровень (активизация экзогенных процессов). Таким образом, определены критерии, которые позволяют использовать их для подтверждения корректности выделения наиболее нарушенных трещиноватостью участков массива. Корректность методики выделения зон повышенной трещиноватости в пределах локальных структур подтверждена критериями, которые были использованы для решения этой задачи. Она может быть использована в качестве основы при крупномасштабном инженерно-геологическом районировании в пределах локальных тектонических структур.

Keywords:

local tectonic structures, tectonic fracturing, stresses, deformations, rock structure, rock properties, criteria for identifying weakened zones of a massif, hypergenesis, exogenous processes.

The relevance of the research lies in the approach to assessing the engineering-geological conditions within the local tectonic structures and their role in the formation of the properties of rocks and the state of the massifs composed by them. The formulation of the question regarding the rocks of the red-colored terrigenous formation as a separate object of engineering and geological research allows us to take into account the features of the history and mechanism of development of local structures, as well as their influence on the reaction of rocks in this case. Particular attention is paid to the role of tectonic fracturing as a consequence of the mechanism of development of local structures and its influence on the activation of hypergenesis processes.

An analysis of the behavior of rocks during the development of local structures and the response of the massif to changes in the state of rocks and the activation of hypergenesis processes was carried out, which, in turn, determined the engineering-geological situation at the current moment. Particular attention was paid to the assessment of tectonic fracturing, identification of weakened zones and criteria confirming the correctness of their identification. The methods used in solving the tasks were reduced to a comprehensive study of local structures: the study of the history of their development, size, amplitude of uplift of the foundation, instrumental survey of fracturing in outcrops with subsequent construction of a map of fracturing, sampling, laboratory studies of the structure and properties of rocks, fixation of exogenous processes within the structure.

The results of the research were the established dependences of the influence of tectonic fracturing on the state of rocks at three levels: the microlevel (the reaction of the minerals of the constituent rocks at the level of the crystal lattice in the form of defects that have arisen); mesolevel (changes in the physical and mechanical properties of rocks); macrolevel (activation of exogenous processes). Thus, criteria have been defined that allow using them to confirm the correctness of the selection of the most fractured sections of the massif. The correctness of the methodology for identifying zones of increased fracturing within local structures is confirmed by the criteria that were used to solve this problem. It can be used as a basis for large-scale geotechnical zoning within local tectonic structures.

© Гайнанов Шарибзан Хатинович – доцент, доцент кафедры инженерной геологии и охраны недр, кандидат геолого-минералогических наук (тел.: + 007 (902) 472 75 41, e-mail: gaunanov@inbox.ru).

© Sharibzan Kh. Gainanov – Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Geology and Subsoil Protection, PhD in Geological and Mineralogical Sciences (tel.: + 007 902 472 75 41, e-mail: gaynanov@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Гайнанов Ш.Х. К вопросу инженерно-геологического районирования территорий в пределах локальных тектонических структур // Недропользование. – 2023. – Т.23, №1. – С.18–24. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.3

Please cite this article in English as:

Gainanov S.Kh. On the question of engineering and geological zoning of territories within local tectonic structures. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2023, vol.23, no.1, pp.18-24. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.3

Введение

Необходимость обращения к вопросу инженерно-геологического районирования территорий в пределах локальных тектонических структур обусловлена целым рядом причин. Исследования, проведенные автором ранее, по изучению особенностей условий формирования инженерно-геологических свойств пород терригенной красноцветной формации указывают на существенную роль локальных структур в ходе их развития и влияния на состояние пород и массивов. Изменение физико-механических свойств пород тесно связано с историей развития локальных тектонических структур механизмом их формирования, приведшим к созданию предпосылок для активизации процессов гипергенеза и, как следствие, к преобразованию качества пород и состояния массивов, сложенных ими.

Локальные структуры третьего порядка имеют широкое развитие на территории распространения красноцветной терригенной формации восточной части Русской платформы. Механизм и условия их образования изучены целым рядом исследователей (Л.Н. Розанов, В.В. Белоусов, Ю.А. Косыгин, Э.У. Спенсер, А.П. Виноградов, А.Б. Ронов) [1–8] и другими. Ими было установлено, что особенности формирования структур на платформах определяются характером преобладающих тектонических движений, их вертикальной направленностью. Блоковая тектоника фундамента платформы является основным фактором формирования структур осадочного чехла. Среди исследований, посвященных этому вопросу, следует отметить работы Л.Н. Розанова [2] с детальным анализом механизма формирования структур и их разновидностей. Важным следствием этого является возникновение тектонической трещиноватости, которая послужила толчком и катализатором активизации процессов гипергенеза. Влияние трещиноватости на состояние пород и массивов в целом оценивалось многими исследователями с практической точки зрения [9, 10]. Большое значение придается оценке трещиноватости скальных пород при проектировании гидротехнических сооружений [11–13], а также ее роли по объяснению причин широкого диапазона прочностных характеристик пород на ограниченном участке массива [14–17]. Значительное количество работ в последнее время посвящено решению локальных задач, таких как оценка бортов карьеров, когда устанавливается связь трещиноватости и нарушения прочностных характеристик пород, влияющих на устойчивость отдельных блоков массива. Также производится оценка водообильности на отдельных участках месторождений, связанных с повышенной трещиноватостью [18–23]. Для решения этих задач широко применяются методы математического моделирования. При этом производится оценка как состояния массива в целом [24–28], так и реакция породообразующих минералов, и дефекты, возникающие в них при воздействии высоких напряжений в массивах пород [29–39].

Методологический подход к типизации территорий в пределах локальных структур

С точки зрения инженерной геологии актуальным является вопрос выявления ослабленных зон в пределах всей площади массива и закономерности

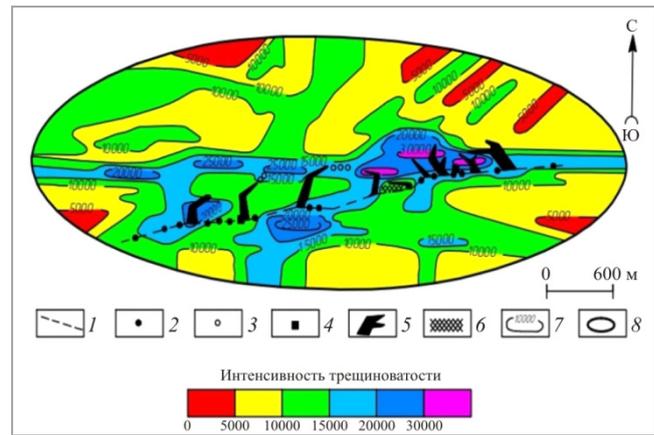


Рис. 1. Карта-схема распределения трещиноватости в пределах Опалихинской локальной структуры: 1 – линия обнажения; 2 – точки отбора образцов; 3 – суффозионные провалы; 4 – места заложения расчисток; 5 – овраги; 6 – участок обнажения, в пределах которого развит оползень; 7 – изолинии показателя интенсивности трещиноватости; 8 – граница структуры

распространения участков с повышенной трещиноватостью с целью установления наименее благоприятных площадей для их освоения. Характер развития трещин в пределах локальных структур в свое время пытались установить с помощью физического моделирования Е.Н. Пермяков [40], М.В. Гзовский [41–43]. Данные, приведенные в этих работах, подтвердили общие принципы развития трещиноватости в массивах. Однако они не могли учитывать ряд факторов в каждой отдельно взятой структуре, связанных с историей ее формирования (геометрические характеристики, размеры осей, амплитуда поднятия блока фундамента, деформационные свойства пород и т.д.). Предлагаемая методика предполагает на первом этапе проводить изучение геологических характеристик конкретной структуры и ее параметров с проведением в последующем инструментальной съемки в полевых условиях с целью построения карты трещиноватости.

При проведении полевых работ и построении карт трещиноватости была использована методика, примененная ранее В.Н. Катаевым [44] и А.И. Печеркиным [45] на кафедре инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ) для решения карстологических задач и опубликованная в [46]. Автором методики была применена при оценке трещиноватости ряда локальных структур на побережье Камских водохранилищ (структуры Опалихинская, Романиха, Ижевский источник). В ходе съемки трещиноватости были отобраны образцы пород из обнажений, которые исследовались в лабораторных условиях. По результатам съемки трещиноватости была построена карта трещиноватости (рис. 1).

Принципы, предлагаемые для решения этой задачи, основаны на методах построения карт трещиноватости локальных структур, где по результатам комплексного изучения массива корректность выделения этих зон подтверждается на разных уровнях состояния пород:

- микроуровень – реакция кристаллической решетки на развитие и возникновение трещиноватости;
- мезоуровень – изменение физико-механических свойств пород трещиноватых участков структуры;

– макроуровень – активизация экзогенных процессов в зонах повышенной тектонической трещиноватости.

Таким образом, предлагаемая методика состоит из двух основных этапов:

– 1-й этап – построение карты трещиноватости локальной структуры;

– 2-й этап – изучение состояния пород с целью оценки корректности выделения зон трещиноватости.

Изменения состояния пород на микроуровне по сути являются основой для начала активизации процессов гипергенеза и связаны они с нарушениями строения кристаллической решетки в ходе возникновения напряжений в породах и, как следствие, деформаций с последующим образованием трещиноватости. При естественном залегании горные породы, находясь в термодинамическом равновесии с окружающей средой, могут фиксировать изменение геологической обстановки в кристаллической структуре составляющих их минералов, вариациях состава и текстуре. Расшифровка информации, закодированной в решетке минералов, в составе и структурно-текстурных особенностях пород, позволяет получить данные для реконструкции характера и механизма процессов и формирования свойств пород [47, 48]. Для получения ответов на перечисленные вопросы автором был применен рентгеноструктурный анализ. Для характеристики микротекстуры использовался показатель текстурированности ($\alpha^{1/2}$), измеряемый в градусах, а также показатель инструментальной ширины пика интенсивности рассеивания (B , мм), который характеризует микродеформации кристаллитов. Исходя из того, что напряжения, определяющие возникновение деформаций и трещиноватости, должны отразиться и на микротекстуре породообразующих минералов, был проведен сравнительный анализ результатов рентгеноструктурного исследования образцов из зон различной степени трещиноватости в пределах локальной структуры. Реакция пород на уровне кристаллической решетки и степень изменения их состояния в зависимости от трещиноватости (L_T) отражены на рис. 2.

Нарушение целостности пород массива отражается и на основных породообразующих минералах. В первую очередь меняется их соотношение: в породе уменьшается содержание наименее устойчивых к воздействию гипергенеза. Кальцит, являясь одним из минералов цемента, наиболее чутко реагирует, и его количество существенно понижается в зонах повышенной трещиноватости (рис. 3). Наиболее устойчивым является кварц.

Описанные изменения в строении и составе пород в зонах повышенной трещиноватости явились причиной ухудшения их плотностных и прочностных характеристик. Это подтверждается результатами лабораторных испытаний и отражено на рис. 4 и 5.

Таким образом, изменение физико-механических свойств пород в зонах повышенной тектонической трещиноватости является еще одним критерием (на мезоуровне) для подтверждения корректности выделения ослабленных зон в пределах локальных структур.

Критерием влияния тектонической трещиноватости на состояние массива на мезоуровне является активизация экзогенных процессов в ослабленных зонах в пределах локальных структур.

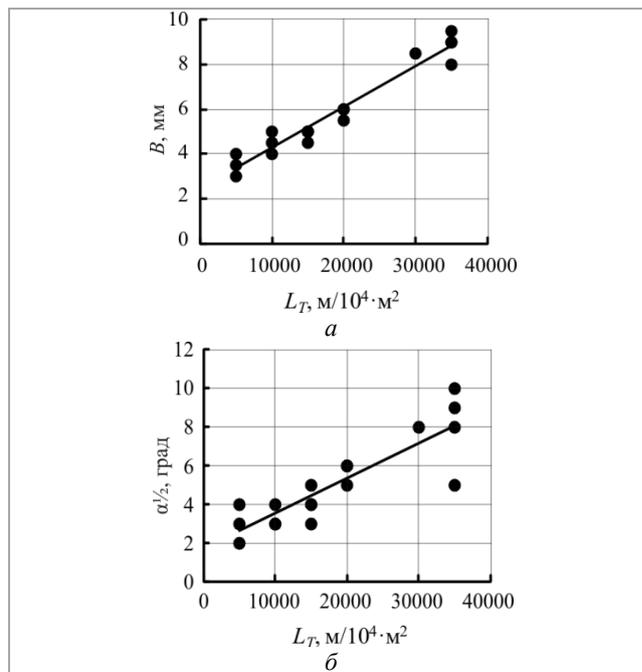


Рис. 2. Зависимость между степенью нарушения кристаллической решетки кварца (B , мм) и трещиноватостью (L_T) (а) и зависимость между степенью нарушения кристаллической решетки кварца ($\alpha^{1/2}$, °) и трещиноватостью (L_T) (б)

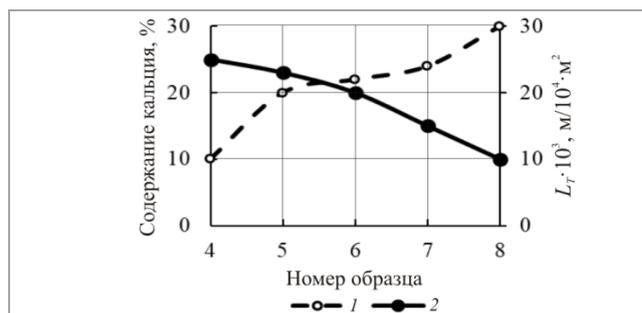


Рис. 3. Влияние тектонической трещиноватости на содержание кальцита в цементе аргиллита: 1 – содержание кальцита (%); 2 – показатель трещиноватости (L_T)

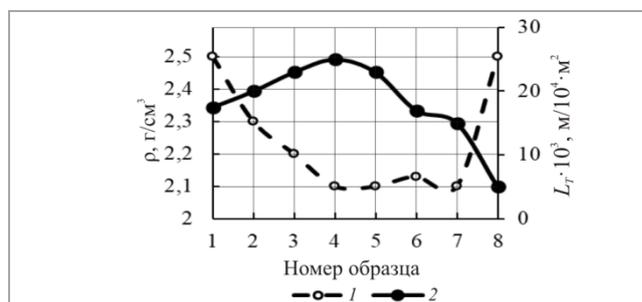


Рис. 4. Влияние тектонической трещиноватости Опалихинской локальной структуры на плотность аргиллитов: 1 – плотность пород; 2 – показатель трещиноватости (L_T)

Автором проведен сравнительный анализ активности ряда экзогенных процессов на участках различной степени трещиноватости. Так, в пределах Опалихинской локальной структуры, закартированы участки проявления овражной эрозии (рис. 6).

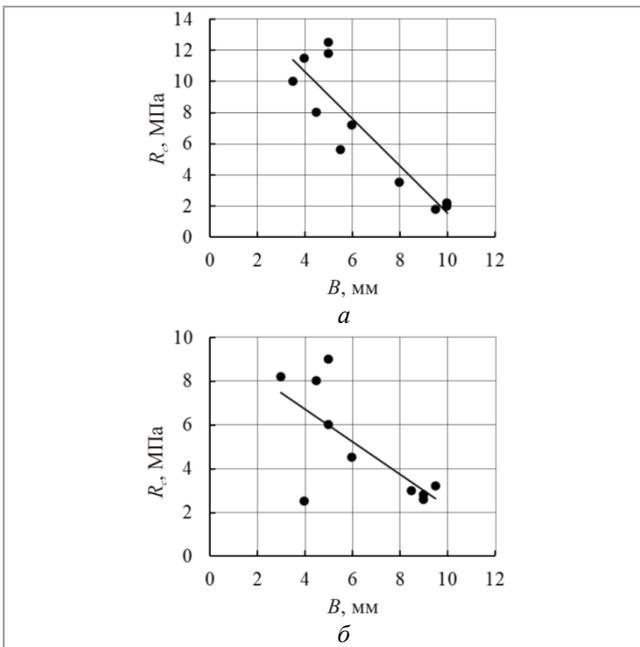


Рис. 5. Влияние нарушенности кристаллической решетки (B , мм) кварца на прочность (R_c , МПа) песчаников (а) и аргиллитов (б)

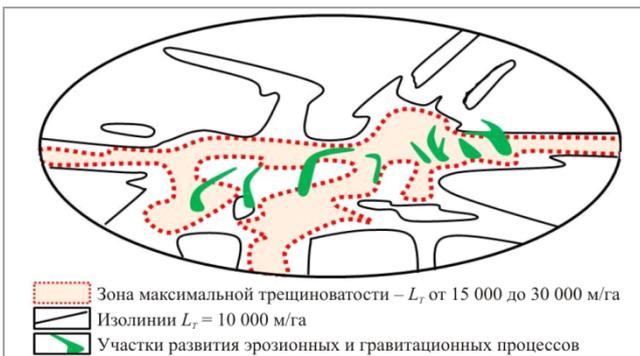


Рис. 6. Схема пространственного соотношения зоны максимальной трещиноватости пород и участков развития эрозионной эрозии и оползневых процессов в пределах Опалихинской локальной структуры

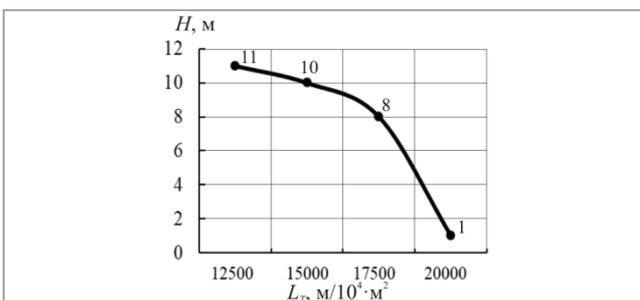


Рис. 7. Влияние трещиноватости локальной структуры на высоту абразионного уступа тальвегов оврагов

Расположение оврагов приурочено к зонам с повышенными показателями трещиноватости ($L_T > 15\ 000$ м/10га). Кроме того, трещиноватость контролируют длину и направление развития эрозионной эрозии. В частности, рост оврагов в сторону водораздела ограничивается зоной максимальной трещиноватости в осевой части структуры. Центральная часть массива (наиболее раздробленная) также отмечается переходом

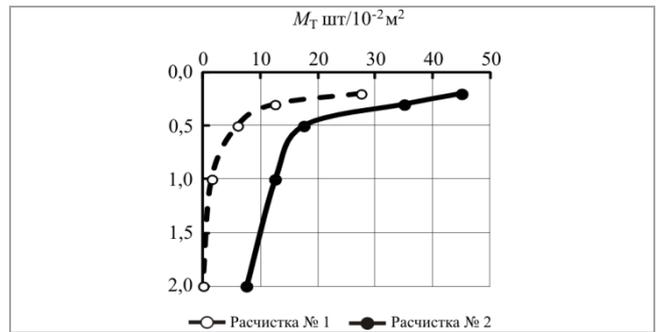


Рис. 8. Изменение модуля трещиноватости аргиллитоподобных глин с глубиной

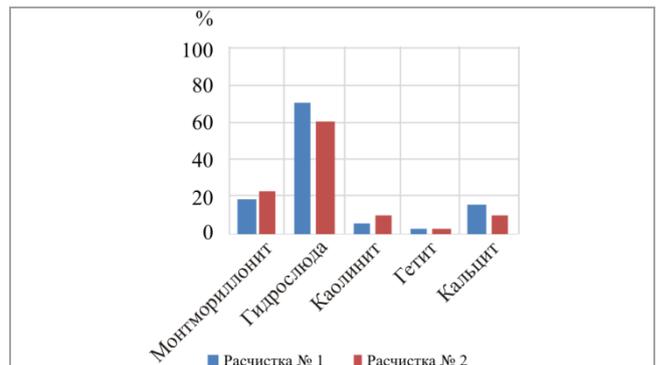


Рис. 9. Содержание минералов в расчитках по данным термического анализа

оврагов в ряд суффозионных воронок, вытянутых вдоль центральной оси структуры.

Еще одним показателем овражной эрозии может являться высота абразионного уступа тальвегов оврагов. Наиболее раздробленные участки массива характеризуются минимальной высотой тальвега (рис. 7).

Выветривание, представляющее собой совокупность целого ряда физических и химических процессов, реагирует на наличие тектонической трещиноватости особенно чувствительно, поскольку нарушенное состояние пород массива создает благоприятные условия для активизации гипергенеза. С момента начала формирования локальных структур в условиях высоких напряжений и деформаций идет существенная перестройка строения минералов, их состава и количественного соотношения. Для оценки влияния трещиноватости на процессы выветривания на участках с разной степенью трещиноватости были заложены расчитки, в которых на разных глубинах замерялся модуль трещиноватости (M_T). Расчитка № 1 – участок с пониженным модулем трещиноватости. Расчитка № 2 участок в зоне повышенной трещиноватости.

На рис. 8 представлено изменение модуля трещиноватости аргиллитоподбных глин с глубиной в расчитках № 1, 2. На рис. 9 представлен минералогический состав по данным термического анализа.

Абразия, активность которой изучалась на берегах Камских водохранилищ в течение более 30 лет лабораторией ЕНИ ПГНИУ, также закономерно реагирует на влияние тектонической трещиноватости. В данном случае сравнивались скорость переработки берегов, сложенных терригенными породами (песчаники и аргиллиты), находящихся в пределах локальных структур и вне их по реперным точкам. Результаты наблюдений приведены в таблице.

Сравнение интенсивности переработки берегов в пределах локальных структур и вне их

Водохранилище	Участок водохранилища	Среднегодовые значения переработки берегов, м/10 лет		
		1960–1970 гг.	1970–1980 гг.	1980–1990 гг.
В пределах локальных структур				
Воткинское	Толстик	0,5–1,0	0,2–1,2	0,7–1,3
	Новоильинск	0,3–0,9	0,6–0,8	0,4–0,9
	Таборы	0,5–1,2	0,6–0,9	0,9–1,2
	Монастырка	1,5–2,4	1,0–1,8	2,0–3,3
Камское	Кононовка	0,7–1,4	1,2–1,5	0,8–1,2
	Быстрая	0,9–1,5	0,7–1,3	1,3–1,5
	Усть-Гаревая	1,2–1,7	0,9–1,5	1,4–1,0
	Среднее	1,9	1,0	1,3
За пределами локальных структур				
Воткинское	Дворцовая Слудка	0,1–0,3	0,2–0,4	0,0–0,2
	Трухията	0,3–0,5	0,3–0,7	0,3–0,5
	Костоватик	0,7–0,12	0,5–0,7	0,3–0,9
Камское	Таман	0,0–0,2	0,1–0,4	0,1–0,3
	Кондас	0,2–0,4	0,1–0,3	0,2–0,3
	Городище	0,0–0,3	0,4–0,8	0,3–1,0
	Усть-Косьва	0,2–0,3	0,3–0,5	0,0–0,3
	Среднее	0,3	0,4	0,4

Ожидаемо скорость переработки берегов в пределах локальных структур в силу наличия в них трещиноватости превышает скорость отступления берега на участках, расположенных за их пределами.

Заключение

Методика выделения зон повышенной трещиноватости в пределах локальных тектонических структур может быть использована при инженерно-геологической оценке территории массивов с целью прогнозирования наиболее неблагоприятных участков для инженерного освоения и требующих особого внимания в процессе выполнения проектных работ и специальных проектных решений.

Корректность выделения зон повышенной трещиноватости подтверждена комплексом критериев на разных уровнях: микроуровень – состояние кристаллической решетки; мезоуровень – физико-механические свойства пород; макроуровень – активизация экзогенных процессов.

Тесная связь этих критериев с интенсивностью тектонической трещиноватости (L_T) позволяет использовать этот показатель в качестве базового для определения зон различной степени нарушенности массива.

Выделение таксонов по показателю (L_T) в пределах локальных структур может быть использовано для решения задач при крупномасштабном инженерно-геологическом районировании.

Библиографический список

1. Розанов Л.Н. Основные закономерности морфологии и причины образования тектонических структур. – Л.: Гостоптехиздат, 1962. – 84 с.
2. Розанов Л.Н. Динамика формирования тектонических структур платформенных областей. – Л.: Недра, 1981. – 140 с.
3. Белоусов В.В. Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. – М.: АН СССР, 1952. – 147 с.
4. Белоусов В.В. Геотектоника. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 334 с.
5. Косыгин Ю.А. Тектоника. – М.: Недра, 1983. – 536 с.
6. Спенсер Э.У. Введение в структурную геологию. – Л.: Недра, 1981. – 367 с.
7. Виноградов А.П., Ронов А.Б. Состав осадочных пород Русской платформы в связи с историей ее тектонических движений // Геохимия. – 1956. – №6. – С.3–24.
8. Сравнительная геология геосинклинальных и платформенных осадочных толщ / А.Б. Ронов, Ю.П. Гирин, Г.А. Казаков, М.Н. Илюхин // Геохимия. – 1965. – №8. – С. 961–976.
9. Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. – М.: Недра, 1973. – 216 с.
10. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. – М.: Наука, 1983. – 240 с.
11. Reuter F., Klengel J., Pasek J. Ingenieurgeologie. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1980. – 451 s.
12. Dittrich E. Beobachtungen über den Kluftkörper // Bergakademie. – 1970. – 3. – S. 151–160.
13. Georgi F., K.H. Hoffer O. u.a. Untersuchungen zum Bruch- und Vormingverhalten des Bergsberghaltens // Neue Bergbautechnik. – 1971. – 9. – S. 692–690.
14. Muller L. Der Felsbau. 1 Bd. – Wien: Springer Verlag, 1963 – 200 s.
15. Beitrag zur ingenieurgeologischen Beschreibung von permischen Rotsedimenten / Sh. Gainanov, F. Reuter, B. Ulrich, W. Kataev // Neue Bergbautechnik. – 1989. – Vol. 7. – S. 241–245.
16. Гайнанов Ш.Х. Влияние тектонических напряжений в массивах пород на изменение их строения и свойств // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 71–78. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-71-78
17. Gainanov Sh., Reuter F. Der Einfluss der tektonischen Beanspruchung von Gestein und Gebirge auf die Entwicklung ihrer physikalisch-mechanischen Eigenschaften – ausgewählte Beispiele // Neue Bergbautechnik. – 1983. – Vol. 12. – S. 681–684.
18. Иконников Е.А., Катаев В.Н., Ермолович И.Г. Повышение эффективности выявления водообильных трещинных зон в фашиально-невыверженных песчано-глинистых толщах // Комплексные проблемы гидрогеологии: материалы научной конференции / Санкт-Петербургский ун-т. – СПб., 2011. – С. 72–74.
19. Тянь С.Г., Долгонос В.Н. Изучение трещиноватости пород на месторождении «Северный Катпар» [Электронный ресурс] // Молодой ученый. – 2020. – №20(310). – С. 145–150. – URL: <https://moluch.ru/archive/310/69958/> (дата обращения: 23.04.2023).
20. Луганцев Б.Б. Обеспечение устойчивости подземных горных выработок в трещиноватом породном массиве: автореф. дис. ... д-ра тех. наук. – М., 2001. – 36 с.
21. Оценка состояния массива горных пород для выделения потенциально опасных участков проектируемого карьера / С.А. Корчак, И.В. Абатурова, И.А. Савинцев, Л.А. Сторожено // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 87–98. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_87
22. Кузьмин В.С., Копытин А.С. Применение компьютерных технологий для решения задач, связанных с изучением трещиноватости скальных массивов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 3. – С. 83–92.
23. Kakimi T. Depth of fracturing in Earths crust // Journal of the Geological Society of Japan. – 1971. – Vol. 77, № 5. – P. 237–242.
24. Корчак С.А. Получение исходных данных для построения прогнозной инженерно-геологической модели // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 5. – С. 66–76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-5-66-76
25. Мингазутдинов А.Н., Семенова О.В. Прогнозирование развития зон трещиноватости с помощью исследования ориентированного керна // Нефтяная провинция. – 2017. – № 3(11). – С. 84–95. DOI: 10.25689/NP.2017.3.84-95
26. Методика оценки напряженного состояния горных пород / В.В. Середин, А.С. Хрулев, А.В. Растегаев, В.И. Галкин // Горный журнал. – 2020. – № 2. – С. 30–34. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.03

27. Siegesmund S., Snethlage R. Stone in architecture: properties, durability. – Berlin: Springer, 2011. – 558 p.
28. Application of ultrasonic-rebound method in fast prediction of rock strength / Rui Wang, Xianhui Deng, Yaovao Meng, Daohong Xia // *Geotechnical and Geological Engineering, International Journal*. – 2020. – Vol. 38. – P. 5915–5924. DOI: org/10.1007/s10706-020-01402-6
29. Журавков М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов). – Минск: БГУ, 2002. – 456 с.
30. Закревский К.Е., Кундин А.С. Особенности геологического 3D моделирования карбонатных и трещиноватых резервуаров. – М.: Белый ветер, 2016. – 404 с.
31. Константинова С.А., Аптуков В.Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. – Новосибирск: Наука, 2013. – 191 с.
32. Ливинский И.С., Митрофанов А.Ф., Макаров А.Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность // *Горный журнал*. – 2017. – №8. – С. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.09
33. Оловянный А.Г. Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения в трещиноватых массивах горных пород // *Записки горного института*. – 2010. – Т. 185. – С. 95–98.
34. Редькин Г.М. Математическое моделирование трещиноватости массива горных пород // *Известия ВУЗОВ. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2005. – № 4. – С.79–82.
35. Nicholson G.A., Bieniawski Z.T. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification // *International Journal of Mining and Geological Engineering*. – 1990. – Vol.8. – P. 181–202. DOI: org/10.1007/BF01554041
36. Chemenda A.I., Hassani R., Fan J. Numerical modeling of the opening mode fracturing emanating from deformation localization in layered rocks // *Computers and Geotechnics*. – 2022. – Vol. 147. DOI: org/10.1016/j.compgeo.2022.104774
37. A three-dimensional numerical meso-approach to modeling time-independent deformation and fracturing of brittle rocks / Guang-lei Zhou, Tao Xu, Michael J. Heap, Philip G. Meredith, Thomas M. Mitchell, Ashley Stanton-Yonge Sestic, Yang Yuan // *Computers and Geotechnics*. – 2020. – Vol. 117. DOI: org/10.1016/j.compgeo.2019.103274
38. Elasto-plastic analysis of the surrounding rock mass in circular tunnel using a new numerical model based on generalized nonlinear unified strength theory / Chengwen Wang, Xiaoli Liu, Danqing Song, Enzhi Wang, Jianmin Zhang // *Computers and Geotechnics*. – 2023. – Vol. 154. DOI: org/10.1016/j.compgeo.2022.105163
39. Влад С.В. О численном моделировании трещиноватых скальных массивов при геотектонических нагрузках // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2014. – № 11. – С. 32–35.
40. Пермяков Е.Н. Тектоническая трещиноватость Русской платформы. – М.: Изд-во МОИП, 1949. – 215 с.
41. Гзовский М.В. Тектонофизические представления о напряженном состоянии земной коры // *Современные проблемы механики горных пород: материалы 4-й Всесоюз. конф. по механике горных пород*. – Л.: Наука, 1972. – С. 125–146.
42. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
43. Белоусов В.В., Гзовский М.В. Экспериментальная тектоника. – М.: Недра, 1964. – 119 с.
44. Катаев В.Н., Печеркин А.И., Печеркин И.А. Моделирование полей напряжений при образовании и развитии локальных структур платформенного типа // *Моделирование в гидрогеологии и инженерной геологии*. – 1983. – С.89–93.
45. Печеркин А.И. К расчету напряжений, возникающих при формировании структур полной складчатости // *Инженерная геология*. – 1987. – № 2. – С. 95–105.
46. Гайнанов Ш.Х., Катаев В.В. Выявление зон трещиноватости в пределах локальных структур, сложенных терригенными красноцветными породами // *Инженерная геология*. – 1988. – № 6. – С. 92–97.
47. Пономарев В.В. Рентгеноструктурные методы исследования в инженерной геологии. – М.: Недра, 1981. – 194 с.
48. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.

References

1. Rozanov L.N. Osnovnye zakonomernosti morfologii i prichiny obrazovaniia tektonicheskikh struktur [The main regularities of morphology and the reasons for the formation of tectonic structures]. Leningrad: Gostoptekhizdat, 1962, 84 p.
2. Rozanov L.N. Dinamika formirovaniia tektonicheskikh struktur platformennykh oblastei [Dynamics of formation of tectonic structures of platform areas]. Leningrad: Nedra, 1981, 140 p.
3. Belousov V.V. Tektonicheskie razryvy, ikh tipy i mekhanizm obrazovaniia [Tectonic faults, their types and mechanism of formation]. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1952, 147 p.
4. Belousov V.V. Geotektonika [Geotectonics]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet, 1976, 334 p.
5. Kosygin Iu.A. Tektonika [Tectonics]. Moscow: Nedra, 1983, 536 p.
6. Spenser E.U. Vvedenie v strukturu i geologiiu [Introduction to structural geology]. Leningrad: Nedra, 1981, 367 p.
7. Vinogradov A.P., Ronov A.B. Sostav osadochnykh porod Russkoi platformy v sviazi s istoriei ee tektonicheskikh dvizhenii [The composition of sedimentary rocks of the Russian platform in connection with the history of its tectonic movements]. *Geokhimiia*, 1956, no. 6, pp. 3-24.
8. Ronov A.B., Girin Iu.P., Kazakov G.A., Piiukhin M.N. Sravnitel'naia geokhimiia geosinklinal'nykh i platformennykh osadochnykh tolshch [Comparative geochemistry of geosynclinal and platform sedimentary strata]. *Geokhimiia*, 1965, no. 8, pp. 961-976.
9. Rats M.V. Strukturnye modeli v inzhenernoi geologii [Structural models in engineering geology]. Moscow: Nedra, 1973, 216 p.
10. Chernyshev S.N. Treshchiny gornykh porod [Rock cracks]. Moscow: Nedra, 1983, 240 p.
11. Reuter F., Klengel J., Pasek J. Ingenieurgeologie. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1980, 451 p.
12. Dittrich E. Beobachtungen über den Kluffkörper. *Bergakademie*, 1970, 3, pp. 151-160.
13. Georgi F., K.H. Hoffer O. u.a. Untersuchungen zum Bruch- und Vorgangverhalten des Gebirgsverhaltens. *Neue Bergbautechnik*, 1971, 9, pp. 692-690.
14. Muller L. Der Felsbau. 1 Bd. Wien: Springer Verlag, 1963, 200 p.
15. Gainanov Sh., Reuter F., Ulrich B., Kataev W. Beitrag zur ingenieurgeologischen Beschreibung von permischen Rotsedimenten. *Neue Bergbautechnik*, 1989, vol. 7, pp. 241-245.
16. Gainanov Sh.Kh. Vliianie tektonicheskikh napriazhenii v massivakh porod na izmenenie ikh stroeniia i svoistv [Tectonic stresses impact on rock mass structure and properties]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2021, no. 3, pp. 71-78. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-71-78
17. Gainanov Sh., Reuter F. Der Einfluss der tektonischen Beanspruchung von Gestein und Gebirge auf die Entwicklung ihrer physikalisch-mechanischen Eigenschaften - ausgewählte Beispiele. *Neue Bergbautechnik*, 1983, vol. 12, pp. 681-684.
18. Ikonnikov E.A., Kataev V.N., Ermolovich I.G. Povyshenie effektivnosti vyavleniia vodoobil'nykh treshchinnykh zon v fatsial'no-veyderzhannykh peschano-glinistykh tolshchakh [Increasing the efficiency of detecting water-abundant fractured zones in facially unsettled sandy-clay strata]. *Kompleksnye problemy gidrogeologii: materialy nauchnoi konferentsii*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii universitet, 2011, pp. 72-74.
19. Tian S.G., Dolgonosov V.N. Izuchenie treshchinovatosti porod na mestorozhdenii "Severnii Katpar" [Study of cracking of breeds on "Northern Katpar" deposit]. *Molodoi uchenyi*, 2020, no. 20(310), pp. 145-150, available at: <https://moluch.ru/archive/310/69958/> (accessed 23 April 2023).
20. Lugantsev B.B. Obespechenie ustoiчивosti podzemnykh gornykh vyrabotok v treshchinovatom porodnom massive [Ensuring the stability of underground mine workings in a fractured rock mass]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2001, 36 p.
21. Korchak S.A., Abaturova I.V., Savintsev I.A., Storozhenko L.A. Otsenka sostoiianiia massivа gornykh porod dlia vydeleniia potentsial'no opasnykh uchastkov proektiruemogo kar'era [Rock mass quality assessment to reveal potentially hazardous areas in open pit mine design]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2022, no. 9, pp. 87-98. DOI: 10.25018/0236.1493.2022.9.0.87
22. Kuz'min V.S., Kopytin A.S. Primenenie komp'iuternykh tekhnologii dlia resheniia zadach, svyazannykh s izucheniem treshchinovatosti skal'nykh massivov [Application of computer technologies for solving problems related to the study of fractures in rock masses]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2013, no. 3, pp. 83-92.
23. Kakimi T. Depth of fracturing in Earths crust. *Journal of the Geological Society of Japan*, 1971, vol. 77, no. 5, pp. 237-242.
24. Korchak S.A. Poluchenie iskhodnykh dannykh dlia postroeniia prognoznoi inzhenerno-geologicheskoi modeli [Obtaining initial data for forecast engineering geological model construction]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2022, no. 5, pp. 66-76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-5-66-76
25. Mingazutdinov A.N., Semenova O.V. Prognozirovanie razvitiia zon treshchinovatosti s pomoshch'iu issledovaniia orientirovannogo kerna [Predicting rock-fracture zone development based on oriented core analysis]. *Neftianaiia provintsiia*, 2017, no. 3(11), pp. 84-95. DOI: 10.25689/NP.2017.3.84-95
26. Seredin V.V., Khrulev A.S., Rastegaev A.V., Galkin V.I. Metodika otsenki napriazhennogo sostoiianiia gornykh porod [Procedure of stress state assessment in rocks]. *Gornyi zhurnal*, 2020, no. 2, pp. 30-34. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.03

27. Siegesmund S., Snethlage R. Stone in architecture: properties, durability. Berlin: Springer, 2011, 558 p.
28. Wang Rui, Deng Xianghui, Meng Yaoyao, Xia Daohong. Application of ultrasonic-rebound method in fast prediction of rock strength. *Geotechnical and Geological Engineering. International Journal*, 2020, vol. 38, pp. 5915-5924. DOI: org/10.1007/s10706-020-01402-6
29. Zhuravkov M.A. Matematicheskoe modelirovanie deformatsionnykh protsessov v tverdykh deformiruemyykh sredakh (na primere zadach mekhaniki gornykh porod i massivov) [Mathematical modeling of deformation processes in solid deformable media (on the example of problems of mechanics of rocks and massifs)]. Minsk: Belorusskii gosudarstvennyi universitet, 2002, 456 p.
30. Zakrevskii K.E., Kundin A.S. Osobennosti geologicheskogo 3D modelirovaniia karbonatnykh i treshchinovatykh rezervuarov [Features of geological 3D modeling of carbonate and fractured reservoirs]. Moscow: Belyi veter, 2016, 404 p.
31. Konstantinova S.A., Aptukov V.N. Nekotorye zadachi mekhaniki deformirovaniia i razrusheniia solianykh porod [Some problems in the mechanics of deformation and fracture of salt rocks]. Novosibirsk: Nauka, 2013, 191 p.
32. Livinskii I.S., Mitrofanov A.F., Makarov A.B. Kompleksnoe geomekhanicheskoe modelirovanie: struktura, geologiya, razumnaia dostatochnost' [Complex geomechanical modeling: structure, geology, reasonable sufficiency]. *Gornyi zhurnal*, 2017, no. 8, pp. 51-55. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.09
33. Oloviannyi A.G. Matematicheskoe modelirovanie protsessov deformirovaniia i razrusheniia v treshchinovatykh massivakh gornykh porod [Mathematical modeling of deformation processes and failure in fractured rock mass]. *Zapiski gornogo instituta*, 2010, vol. 185, pp. 95-98.
34. Red'kin G.M. Matematicheskoe modelirovanie treshchinovatosti massiva gornykh porod [Mathematical modeling of fractures in a rock mass]. *Izvestiia vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2005, no. 4, pp. 79-82.
35. Nicholson G.A., Bieniawski Z.T. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1990, vol.8, pp. 181-202. DOI: org/10.1007/BF01554041
36. Chemenda A.I., Hassani R., Fan J. Numerical modeling of the opening mode fracturing emanating from deformation localization in layered rocks. *Computers and Geotechnics*, 2022, vol. 147. DOI: org/10.1016/j.compgeo.2022.104774
37. Zhou Guang-lei, Xu Tao, Heap Michael J., Meredith Philip G., Mitchell Thomas M., Ashley Stanton-Yonge Sesnic, Yuan Yang. A three-dimensional numerical meso-approach to modeling time-independent deformation and fracturing of brittle rocks. *Computers and Geotechnics*, 2020, vol. 117. DOI: org/10.1016/j.compgeo.2019.103274
38. Wang Chengwen, Liu Xiaoli, Song Danqing, Wang Enzhi, Zhang Jianmin. Elasto-plastic analysis of the surrounding rock mass in circular tunnel using a new numerical model based on generalized nonlinear unified strength theory. *Computers and Geotechnics*, 2023, vol. 154. DOI: org/10.1016/j.compgeo.2022.105163
39. Vlad S.V. O chislenom modelirovanii treshchinovatykh skal'nykh massivov pri geotektonicheskikh nagruzkakh [On numerical modeling of fractured rock massifs under geotectonic loads]. *Promyshlennoe i erazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. no. 11. nn. 32-35.
40. Permiakov F.N. Tektonicheskaiia treshchinovatost' Russkoi platformy [Tectonic jointing of the Russian platform]. Moscow: Moskovskoe obshchestvo ispytatelei prirody, 1949, 215 p.
41. Gzovskii M.V. Tektonofizicheskie predstavleniia o napriazhennom sostoianii zemnoi kory [Tectonophysical ideas about the stress state of the earth's crust]. *Sovremennye problemy mekhaniki gornykh porod. Materialy 4-i Vsesoiuznoi konferentsii po mekhanike gornykh porod*. Leningrad: Nauka, 1972, pp. 125-146.
42. Gzovskii M.V. Osnovy tektonofiziki [Fundamentals of tectonophysics]. Moscow: Nauka, 1975, 536 p.
43. Belousov V.V., Gzovskii M.V. Eksperimental'naia tektonika [Experimental tectonics]. Moscow: Nedra, 1964, 119 p.
44. Kataev V.N., Pecherkin A.I., Pecherkin I.A. Modelirovanie polei napriazhenii pri obrazovanii i razvitii lokal'nykh struktur platformennogo tipa [Modeling of stress fields during the formation and development of platform-type local structures]. *Modelirovanie v gidrogeologii i inzhenernoi geologii*, 1983, pp. 89-93.
45. Pecherkin A.I. K raschetu napriazhenii, voznikaiushchikh pri formirovanii struktur polnoi skladchatosti [On the calculation of stresses arising during the formation of structures of complete folding]. *Inzhenernaia geologiya*, 1987, no. 2, pp. 95-105.
46. Gainanov Sh.Kh., Kataev V.V. Vyivlenie zon treshchinovatosti v predelakh lokal'nykh struktur, slozhennykh terrigennymi krasnotsvetnymi porodami [Identification of fracture zones within local structures composed of terrigenous red-colored rocks]. *Inzhenernaia geologiya*, 1988, no. 6, pp. 92-97.
47. Ponomarev V.V. Rentgenostrukturnye metody issledovaniia v inzhenernoi geologii [X-ray structural research methods in engineering geology]. Moscow: Nedra, 1981, 194 p.
48. Rusakov A.A. Rentgenografiia metallov [Radiography of metals]. Moscow: Atomizdat, 1977, 480 p.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.