

УДК 622.83+551.24

**Тагильцев Сергей Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой гидрогеологии,  
инженерной геологии и геоэкологии,  
Уральский государственный  
горный университет,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30  
e-mail: [tagiltsev@k66.ru](mailto:tagiltsev@k66.ru)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
И ТЕХНОГЕННЫХ ПРИЗНАКОВ  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВКИ  
ГЛАВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ  
НАПРЯЖЕНИЙ В РАЙОНЕ  
Г. ЕКАТЕРИНБУРГА**

*Аннотация:*

На основе представлений о роли напряженного состояния земной коры в образовании и активизации тектонических разломов выполнено изучение характеристик поля напряжений в районе г. Екатеринбурга. В ходе исследований были использованы данные измерений напряженного состояния массивов горных пород и результаты исследований гидрогеологической роли тектонических нарушений на рудных месторождениях Урала. Для оценки ориентировки векторов главных нормальных напряжений выполнен анализ геолого-структурных карт территории города, измерения элементов залегания массовых трещин на геологических объектах с последующей тектонофизической интерпретацией диаграмм трещиноватости. Особое внимание уделено анализу роли активных тектонических нарушений в увеличении аварийности подземных коммуникаций городского водопровода.

На основании комплексного анализа геологических и техногенных признаков тектонического воздействия определены два направления действия главного максимального напряжения. В настоящее время главное максимальное напряжение наиболее выражено воздействует на геологическую среду по азимуту 260°. Несколько слабее проявляется направление действия напряжений, ориентированное по азимуту 285°. Тектонические движения в геологической среде оказывают существенное негативное влияние на различные городские сооружения, особенно на подземные коммуникации.

*Ключевые слова:* напряженное состояние земной коры, активизация разломов, ориентировка векторов главных напряжений, аварийность подземных коммуникаций

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.032

**Tagiltsev Sergey N.**

Doctor of Engineering, Professor,  
Head of Department for hydrogeology,  
engineering geology and geo-ecology,  
Ural State mining University,  
620144, Ekaterinburg, Kuibyshev street, 30  
e-mail: [tagiltsev@k66.ru](mailto:tagiltsev@k66.ru)

**USING  
OF THE STRUCTURAL-AND-GEOLOGICAL  
AND MAN-MADE CHARACTERISTICS  
TO DETECT THE ORIENTATION  
OF THE MAIN TECTONIC STRESSES  
IN EKATERINBURG**

*Abstract:*

Characteristics studies of strain fields in the city of Ekaterinburg were carried out on the basis of an idea of the role of the earth's crust in formation and activation of tectonic snaps. Measurement data of strained conditions of rock massifs and the results of studied hydrological role of tectonic disturbances in ore deposits of the Urals were used.

For estimating of main typical stresses the analysis of geological structural maps of the city territory, measurements of mass fractures occurrence at geological objects with the subsequent tectonophysical interpretation of jointing diagrams were carried out. Special attention has been paid to the role of active tectonic dislocations in increasing accidents of the city underground water-pipe communications. Two directions of the main maximum strains were defined on the basis of the complex analysis of geological and man-made features of tectonic influence. At present, the main maximum strain influences mostly the geological environment of the azimuth 260°. The effect of the strain influence oriented along the azimuth 285° is somewhat weaker. Tectonic movements in the geological environment exert considerable, especially on underground communications.

*Keywords:* strained condition of the earth's crust, intensification of snaps, vectors orientating of general strains, accidents on underground communications

Напряженное состояние верхней части земной коры оказывает значительное воздействие на современную подвижность геологической среды. Активность разломов выражается в периодических, нередко возвратно-поступательных подвижках по тектоническим швам [1 – 3]. Эти подвижки, как правило, хорошо проявляются и в приповерхностном слое земной коры. Процесс деформации массивов горных пород, образование массивных открытых трещин и активизация разломов практически полностью определяются уровнем тектонических напряжений и пространственной ориентировкой векторов главных нормальных напряжений [4 – 6].

Состояние земной коры в районе г. Екатеринбурга и уровень воздействия напряжений на различные составляющие городской инфраструктуры до последнего времени специально не изучались. Планомерных серьезных исследований активности геологической среды непосредственно на территории города не проводилось. В целом по Уралу исследования напряженного состояния земной коры выполнялись в течение последних десятилетий в связи с разработкой месторождений полезных ископаемых. Изучение напряженного состояния горных пород с помощью прямых измерений проводилось силами ряда организаций, но основные результаты были получены специалистами Института горного дела УрО РАН. Данные, приведенные в работах [2, 7], свидетельствуют о том, что массивы горных пород находятся под воздействием значительных напряжений. Средние значения горизонтальных напряжений составляют 10 – 30 МПа, а иногда, особенно с глубиной, превышают 50 МПа. Азимуты векторов главных нормальных максимальных напряжений находятся в диапазоне 230 – 300°, но чаще всего фиксируются напряжения, действующие в направлениях от 260 до 290°.

Большинство месторождений полезных ископаемых Урала разрабатывается десятки и сотни лет. Ряд месторождений (Гороблагodatское железорудное, Северо-Песчанское железорудное [2, 7, 8], Североуральские бокситовые и другие) имеет хорошую геологическую, гидрогеологическую и геомеханическую (прямые измерения напряженно-деформированного состояния) изученность. При проведении исследований на конкретном месторождении имеется возможность сравнить с позиций тектонофизики степень достоверности геолого-структурных, геомеханических и гидрогеологических методов анализа проявлений современного поля тектонических напряжений.

Гидрогеологические данные позволяют выделить среди тектонических нарушений наиболее водообильные (проницаемые) разломы. В гидрогеомеханике скальных массивов [6] высокая проницаемость рассматривается как показатель современной тектонической активности (подвижности) конкретного разлома. Геологические и геомеханические данные позволяют определять с достаточно высокой достоверностью кинематический тип разлома. На основании выполненных исследований установлены наиболее типичные для Урала закономерности пространственной ориентировки водоносных зон [9, 10], связанных с тектоническими нарушениями, активными в поле современных напряжений, и составлена типовая роза-диаграмма (рис. 1а).

Анализ гидрогеологических исследований показал, что в современную геологическую эпоху главное нормальное максимальное напряжение в породных массивах имеет переменную ориентировку, но чаще всего действует по двум сопряженным направлениям.

Закономерности изменений ориентировки максимального главного нормального напряжения и их периодичность пока не установлены, но выявлено, что в течение года проявляется действие обоих направлений. Два направления действия главного нормального максимального напряжения образуют между собой характерный угол, равный 25 – 35°. На разных объектах азимуты двух направлений оси главного нормального максимального напряжения могут варьировать в пределах 10 – 20°, и, как правило, укладываются в два диапазона: 255 – 275° и 285 – 300°.

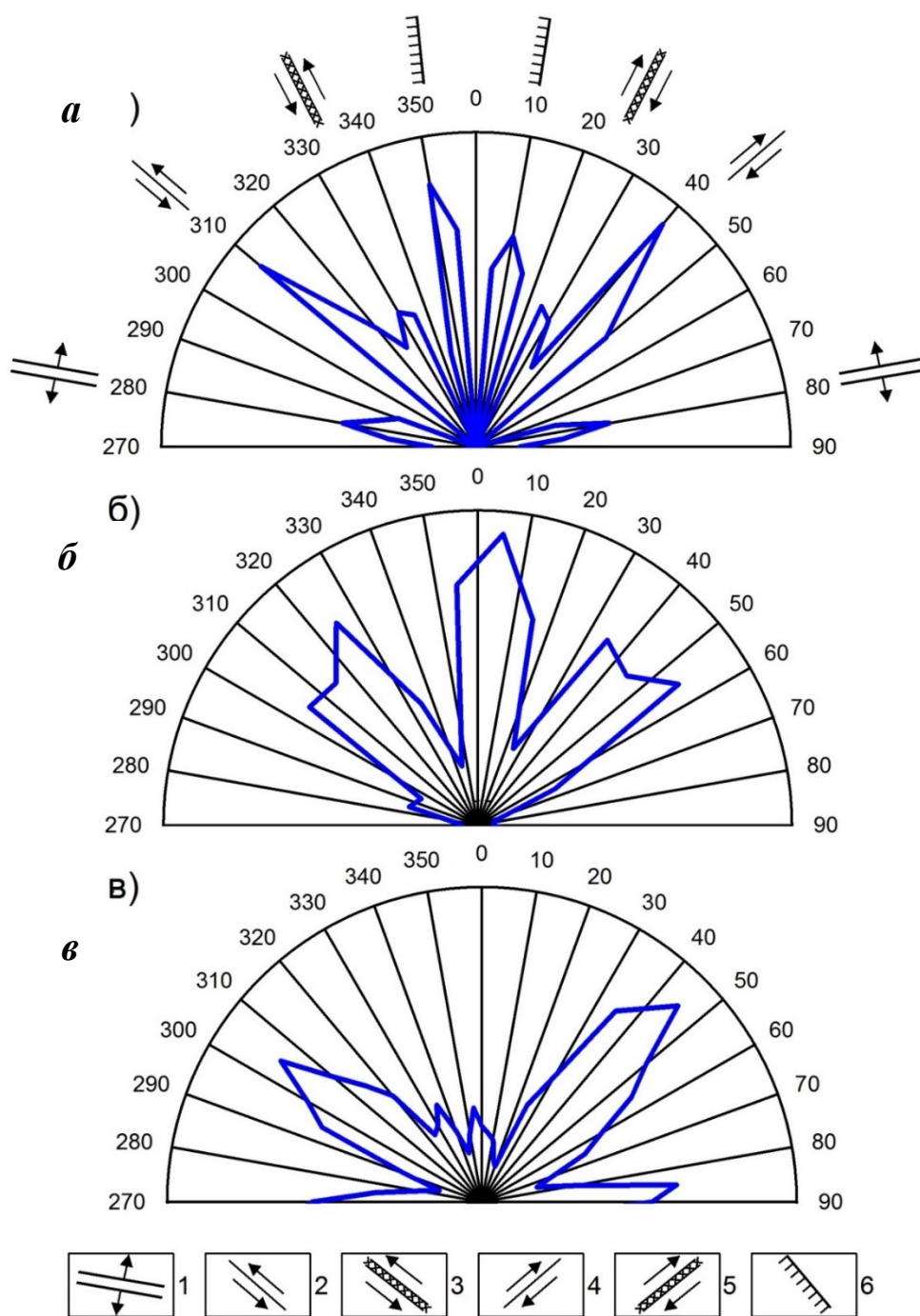


Рис. 1 – Роза-диаграмма:

*a* – теоретическая, *б* – построенная по геолого-структурной карте, *в* – построенная по схеме новейшей тектоники (1 – раздвиг; 2 – левый хрупкий сдвиг; 3 – левый хрупко-пластичный сдвиг; 4 – правый хрупкий сдвиг; 5 – правый хрупко-пластичный сдвиг; 6 – надвиг)

Напряженное состояние земной коры является основной причиной возникновения, развития и активизации основных типов тектонических нарушений: надвигов (взбросов), сдвигов, сбросов, раздвигов. Эти структуры имеют различную ориентировку (простираение) относительно направления действия главного нормального максимального напряжения [10 – 12]. Надвиги образуют с осью максимального напряжения прямой угол. Раздвиги и сбросы развиваются параллельно оси действия главного напряжения. При построении роз-диаграмм активных тектонических нарушений наиболее выраженные участки диаграмм (лучи), отражающие простираение сбросов и надвигов, образуют

между собой угол в  $90^\circ$ . Это угловое соотношение является важным диагностическим признаком, позволяющим уточнять кинематический тип тектонических нарушений. Сдвиги, в зависимости от преимущественной реализации хрупкой или пластичной деформации, могут образовывать с направлением действия главного нормального максимального напряжения угол от  $25$  до  $55^\circ$ .

На территории г. Екатеринбурга для выявления ориентировки осей главных максимальных напряжений были применены геолого-структурные методы, основанные на построении роз-диаграмм ориентировки разломов и построении круговых диаграмм трещиноватости [13]. В процессе исследований были проанализированы геолого-структурная карта города (Левитан Г.М., Ершова К.А., Кудрявцева Т.А., 1976), схема новейшей тектоники территории Екатеринбурга [4], которая является авторской разработкой Гуляева А.Н., охватывает территорию примерно  $30 \times 30$  км в радиусе примерно 15 км от центра города. Основной вариант схемы имеет масштаб 1:50000. Для ее построения использовались геофизические и геологические данные, но особенно тщательно анализировался естественный рельеф изучаемой территории.

Количество линеаментов, использованных при построении конкретных диаграмм, составлял, как правило, не менее семидесяти. На диаграммах можно выделить наиболее выраженные (длинные) лучи, а также слабовыраженные (короткие) лучи. Длинные лучи отражают простирающие наиболее распространенных и протяженных структур. На диаграмме, представленной на рис. 1б, ориентировки наиболее выраженных пиков укладываются в диапазоны азимутов  $305 - 325^\circ$ ,  $355 - 15^\circ$ ,  $35 - 55^\circ$ . Слабовыраженный пик соответствует азимуту  $285^\circ$ . На основании совокупности фактических данных и современных представлений о полях напряжений следует полагать, что при формировании большинства разломов главное максимальное напряжение имело субширотную ориентировку. Надвиги (средний азимут линеаментов –  $15^\circ$ ) образуют прямой угол с преобладающей ориентировкой главного максимального напряжения. Другие основные тектонические структуры представлены сдвигами, которые имеют среднее простирающие  $315^\circ$  (левые сдвиги) и  $45^\circ$  (правые сдвиги).

Изучение и анализ диаграммы, отражающей простирающие новейших тектонических структур (рис. 1в), позволяет сделать вывод, что преобладающее направление вектора главного максимального напряжения ориентировано по азимуту  $265^\circ$ . Основными структурами являются сдвиги, имеющие среднее простирающие  $305$  и  $45^\circ$ . На диаграмме отразились также линеаменты, имеющие азимуты  $335$  и  $355^\circ$ . Полученные результаты соответствуют вышеотмеченным закономерностям, которые характерны для Уральского горно-складчатого региона (см. рис. 1а).

В породах Уктусского габбро-перидотитового массива и Шарташского гранитного карьера были выполнены массовые замеры пространственной ориентировки трещин. Эти геологические объекты находятся на территории г. Екатеринбурга. Уктусский массив располагается между водными объектами в южной части города (рис. 2). Шарташский гранитный карьер находится около озера Шарташ, показанного на схеме (см. рис. 2), в северо-восточной части города. В ходе полевых измерений элементов залегания трещин выбирались открытые трещины, не имеющие минерального заполнителя и других признаков длительной геологической истории. Таким образом, предполагалось, что анализируются современные (в геологическом смысле) трещины, отражающие воздействие современного поля напряжений. Интерпретация данных измерений ориентировки трещин была произведена на основании методических приемов, изложенных в специальной литературе [5, 6]. Распределение трещин в породах Шарташского карьера и Уктусского массива имеет общие закономерности. На всех диаграммах можно выделить два направления действия главного нормального максимального напряжения. Их азимуты составляют  $255 - 260^\circ$ ,  $285 - 295^\circ$ . Таким образом, результаты измерений элементов залегания открытых трещин полностью совпали с выводами, полученными при анализе ориентировки разломных структур.

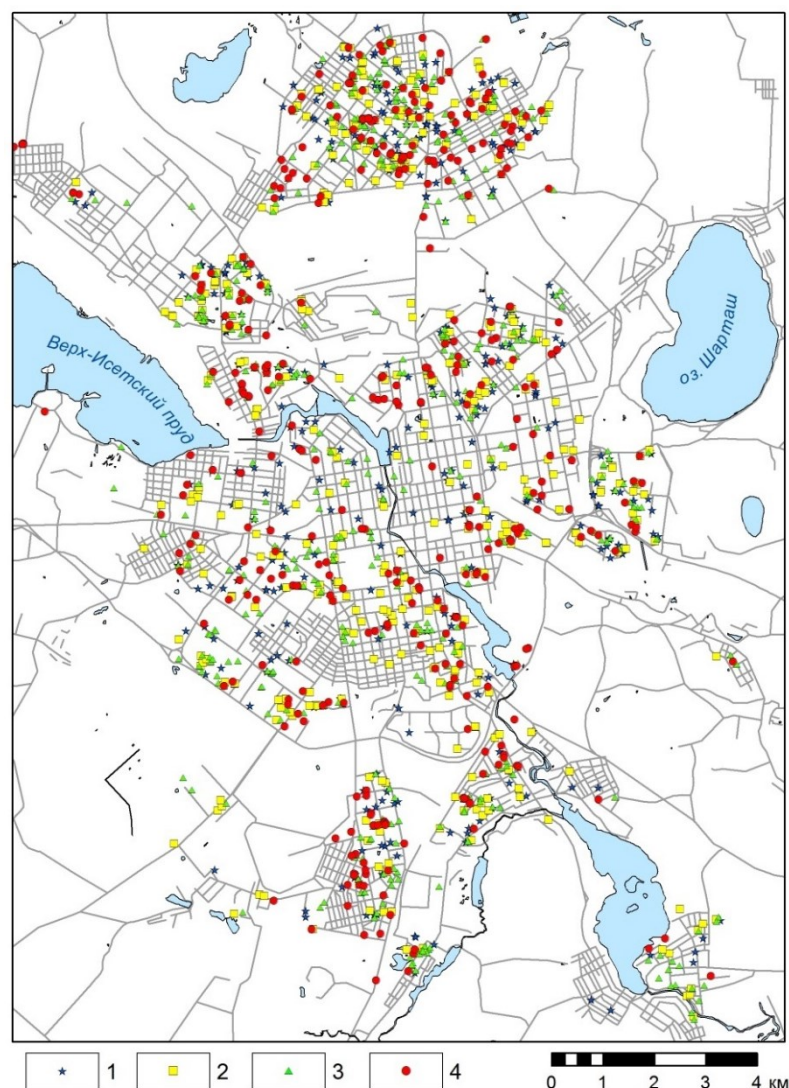


Рис. 2 – Схема аварийных участков труб городского водопровода с характером повреждений «перелом» за период 2004 – 2007 гг. на территории Екатеринбурга: 1 – 2004 г.; 2 – 2005 г.; 3 – 2006 г.; 4 – 2007 г.

Тектонические движения, происходящие под воздействием поля напряжений верхней части земной коры в настоящее время, должны проявляться в деформациях техногенных объектов. Наиболее чувствительными к деформациям верхней части геологического разреза являются протяженные подземные инженерные коммуникации. На участках пересечения данными объектами тектонических структур нередко возникают аварийные ситуации. Для выявления ориентировки главных нормальных напряжений в геологической среде г. Екатеринбурга дополнительно к изучению пространственной ориентировки трещин, разломов, и данных прямых измерений напряженно-деформированного состояния в породных массивах рудных месторождений выполнен анализ пространственной локализации аварийных участков на линиях городского водопровода [12].

Городская водопроводная сеть представляет собой систему относительно хрупких чугунных и стальных труб, заглубленных в грунт на глубину примерно 3 м. Трубы городского водопровода достаточно жестко взаимодействуют с геологической средой и являются наименее защищенными по сравнению с другими видами подземных коммуникаций. По данным предприятия «Горводопровод» на территории г. Екатеринбурга ежегодно происходит более 1000 аварий на линиях городского водопровода. Анализ данных по аварийности водопроводной сети показал, что значительная часть аварий происходит в пределах одних и тех же достаточно компактных участков.

Повреждения на линиях городского водопровода имеют различный характер. В процессе эксплуатации происходят переломы и разрывы труб, возникают трещины, свищи, свищевая коррозия. Причин возникновения аварий достаточно много, в том числе и естественный износ труб. При анализе фактических данных, в первую очередь, учитывались переломы и трещины, которые явно указывают на высокий уровень силового динамического воздействия. Повреждения такого характера составляют порядка 30 % от общего количества аварийных ситуаций (примерно 300 аварий в год). Только эти аварии использовались для выявления линеаментов и построения диаграммы, представленной в данной статье (рис. 3).

Было замечено, что при нанесении на карту города аварий, которые произошли в 2004 – 2007 гг., большинство аварийных участков образуют на карте линейные «цепочки» (см. рис. 2). Такие образования принято называть линеаменами. На схеме города (см. рис. 2) вынесена сетка основных улиц. Большинство водопроводных линий проложено по улицам города. Наличие линеаментов, не связанных с ориентировкой сети подземных коммуникаций, заставляет полагать, что значительная часть аварий возникает в результате деформаций, возникающих в пределах линейных зон тектонических нарушений.

Диаграмма линеаментов, построенных по участкам аварий городского водопровода с характером повреждений «перелом», построена на период наблюдений с 2004 по 2007 г. (см. рис. 3). Большинство аварийных линеаментов имеют среднюю ориентировку  $80^\circ$  ( $260^\circ$ ) с вариациями от  $75$  до  $85^\circ$  ( $255 - 265^\circ$ ). Аналогичное значение имеют линеаменты с ориентировкой  $315^\circ$  с вариациями в пределах  $305 - 335^\circ$ . Следует полагать, что максимальное силовое воздействие на городские подземные коммуникации оказывают тектонические нарушения, имеющие среднее простирание  $260$  и  $315^\circ$ .

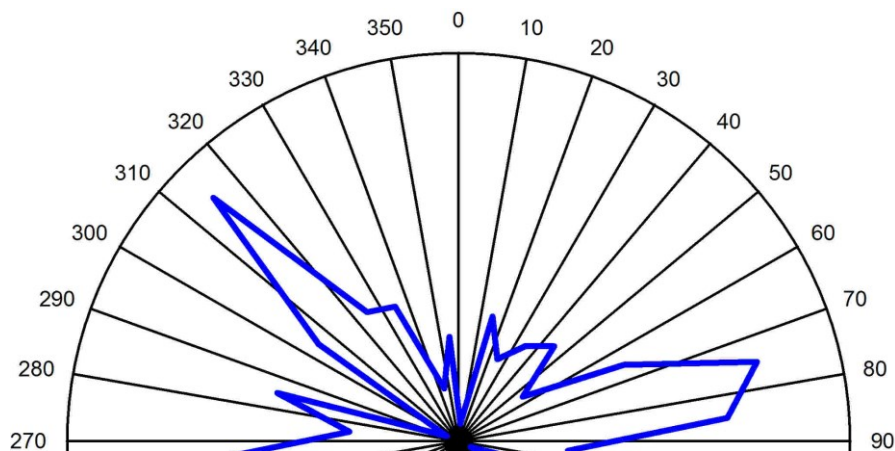


Рис. 3 – Роза-диаграмма линеаментов аварийных участков на трубах городского водопровода с характером повреждений «перелом» за период 2004 – 2007 гг.

Совместный анализ с результатами ранее проведенных исследований (см. рис. 1а) позволяет считать, что преобладающую тектоническую активность проявляют сбросы и сдвиги левой кинематики. Сбросы связаны с главным максимальным напряжением, действующим по направлению  $260^\circ$  [9, 10]. Сдвиги активизируются главным максимальным напряжением, ориентированным по азимуту  $285^\circ$ , с преобладанием хрупкого типа деформации (угол скола –  $30^\circ$ ).

Помимо упомянутых, другие виды тектонических нарушений, показанные на типовой диаграмме (см. рис. 1а), также принимают участие в формировании аварийности с характером повреждений «перелом», но степень их проявления относительно небольшая. В целом следует заключить, что простирание аварийных линеаментов соответствует ориентировке активных структур в поле современных тектонических напряжений.

Таким образом, выполненные исследования позволяют достаточно надежно оценить ориентировку векторов главных максимальных напряжений в геологической среде г. Екатеринбурга. На основании комплексного анализа геологических и техногенных признаков тектонического воздействия определены два направления действия главного максимального напряжения, образующие «действующую пару». Два направления действия главного максимального напряжения имеют азимуты 260 и 285°. В настоящее время главное максимальное напряжение наиболее выражено воздействует по азимуту 260°. Несколько слабее проявляется направление действия напряжений, ориентированное по азимуту 285°. Тектонические движения в геологической среде оказывают существенное негативное влияние на различные городские сооружения, особенно на подземные коммуникации.

### Литература

1. Сашурин А.Д. Роль современной геодинамики в развитии природно-техногенных катастроф в сфере недропользования / А.Д. Сашурин // Геомеханика в горном деле: материалы науч. конф., г. Екатеринбург, 14 - 16 октября 2009 г. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. - С. 158 - 164.
2. Сашурин А.Д. Современные геодинамические движения и их роль в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород / А.Д. Сашурин // Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции, г. Екатеринбург, 4 - 5 июня 2014 г. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. - С. 3 - 12.
3. Тажибаев К.Т. Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород. Т.1 / К.Т. Тажибаев. - Бишкек: Алтын Принт, 2016. - 352 с.
4. Гуляев А.Н. Неотектонические структуры на территории Екатеринбурга / А.Н. Гуляев // Стройкомплекс Среднего Урала. - 2010. - № 54. - С. 38 - 40.
5. Шерман С.Н. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения / С.Н. Шерман, Ю.И. Днепровский. - Новосибирск: Наука, 1989. - 158 с.
6. Тагильцев С.Н. Основы гидрогеомеханики скальных массивов. Учебное пособие / С.Н. Тагильцев. - Екатеринбург: УГГГА, 2003. - 88 с.
7. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков // - Екатеринбург: УрО РАН, 2001. - 335 с.
8. Тагильцев С.Н. Закономерности поля тектонических напряжений в геологической среде Красноуральского рудного района / С.Н. Тагильцев, Т.Н. Кибанова // Известия УГГУ. - 2017. - Вып. 2. - С. 43 - 47.
9. Тагильцев С.Н. Геомеханическая роль тектонических разломов и закономерности их пространственного расположения / С.Н. Тагильцев, А.Е. Лукьянов // Геомеханика в горном деле: доклады научно-технической конференции, г. Екатеринбург, 12 - 14 октября 2011 г. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. - С. 26 - 39.
10. Лукьянов А.Е. Гидрогеомеханический анализ ориентировки водоносных тектонических структур в скальных породах / А.Е. Лукьянов // Известия вузов. Горный журнал. - 2008. - № 8. - С. 182 - 184.
11. Тектонический кодекс России // Г.С. Гусев, Н.В. Межелевский, А.В. Гущин и др. - М.: Геокарт: Геос, 2016. - 240 с.
12. Тагильцев С.Н. Активные разломы и ориентировка главных тектонических напряжений в геологической среде Среднего Урала / С.Н. Тагильцев // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Труды IV Международной научно-практической конференции. - Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016. - С. 364 - 370.
13. Тагильцев С.Н. Анализ ориентировки осей главных напряжений в геологической среде г. Екатеринбурга / С.Н. Тагильцев, А.Ю. Осипова, А.Е. Лукьянов // Известия вузов. Горный журнал, - 2010. - № 3. - С. 42 - 48.