

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ В ПОЛЕ СОВРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

ТАГИЛЬЦЕВ С. Н.¹

¹ Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Цель исследования. Основной целью данного исследования является определение пространственных закономерностей в расположении тектонических нарушений, активных в современном поле геодинамических напряжений. Тектонические разломы рассматриваются как структуры разрушения скальных массивов, возникающих при условиях, когда напряжения в земной коре превышают прочностные свойства скальных пород. Тектонические разломы являются природными регуляторами напряженного состояния земной коры, обеспечивающими деформацию скальных массивов и сброс избыточных тектонических напряжений. Современная активизация тектонических нарушений зависит от ориентировки разломов в поле современных геодинамических напряжений, действующих в определенном участке земной коры. Геодинамическая этажность земной коры определяет изменение ориентировки осей главных напряжений с глубиной, что служит основным фактором образования тектонических разломов разных кинематических типов (надвигов, сдвигов, сбросов).

Результаты исследований. Анализ современной геодинамической структуры скальных массивов Уральского региона показывает, что активные тектонические разломы имеют определенную ориентировку в современном поле напряжений. Главное максимальное напряжение (ГМН), формирующее большинство активных тектонических разломов в современную геологическую эпоху на Урале, имеет два преобладающих направления (две ориентировки). На некоторых объектах основное направление ГМН действует по азимуту 260°. На других территориях преобладает ориентировка ГМН со средним азимутом 285°. Очень часто выявляются участки земной коры, на которых проявляются оба этих направления. Современное поле напряжений испытывает определенные вариации, выражающиеся в изменении основного направления силового воздействия. Наличие двух основных направлений силового воздействия проявляется в пространственной ориентировке тектонических разломов. Существование закономерной сети разломов является элементом самоорганизации скального массива под воздействием тектонических напряжений земной коры.

Область применения результатов. Изучение пространственной ориентировки и геомеханической роли тектонических разломов имеет важное практическое значение. Геомеханические свойства тектонических нарушений определяют их проницаемость для подземных вод, инженерно-геологические характеристики скальных массивов и степень современной геодинамической опасности участков земной коры.

Ключевые слова: тектонические разломы; напряженное состояние земной коры; современная тектоническая активизация; геодинамическая этажность; ориентировка главных максимальных напряжений.

Цель исследований. Тектонические разломы представляют собой зоны нарушения сплошности породного массива. Зоны тектонических нарушений (разломов) представлены в виде участков повышенной трещиноватости и раздробленности пород. В гидрогеологии изучаются тектонические нарушения, которые имеют повышенную проницаемость и являются коллекторами подземных вод. В инженерной геологии и горном деле, помимо гидрогеологических свойств разломов, рассматривается влияние тектонических нарушений на состояние горных выработок и инженерных сооружений.

Возраст тектонических нарушений может быть различным. Следует различать периоды заложения (образования) разлома и периоды его максимальной активизации (подвижности). Если рассматривать активизацию разломов с позиций инженерной геологии, гидрогеологии и горного дела, то современная роль разлома должна определяться не временем его заложения, а степенью подвижности. Образование и активность разлома определяются уровнем тектонических напряжений, которые действовали ранее и действуют в настоящее время в определенном участке земной коры. Помимо уровня сил (напряжений), действующих в массивах горных пород, важное значение имеет ориентировка в пространстве векторов главных нормальных напряжений. Плоскости разломов, подчиняясь законам геомеханики, формируются под определенными углами к векторам главных нормальных напряжений. Современная активизация тектонических нарушений зависит от ориентировки разломов в поле современных геодинамических (тектонических) напряжений, действующих в определенном участке земной коры [1–3].

Таким образом, основной целью данной статьи является определение пространственных закономерностей в расположении тектонических нарушений, активных в современном поле геодинамических напряжений.

Базовые теоретические и методические представления. Картирование и изучение тектонических разломов выполняют в пределах складчатых областей либо при исследовании фундаментов тектонических платформ и плит. Наряду с горно-складчатыми регионами, тектонические разломы нередко выявляются в осадочном чехле платформ и оказывают заметное влияние на свойства покровных отложений. В современной геотектонике под разломами понимают крупные разрывные структуры, которые определяют региональные закономерности развития участков земной коры и длительные исторические этапы ее становления. В поисковой геологии тектонические разломы рассматриваются в качестве рудоуправляющих структур, формирование которых происходило в отдаленные геологические эпохи.

Обзор литературных источников показывает [2–4], что тектонические разломы имеют определенную иерархию, начиная от региональных нарушений протяженностью до нескольких сотен километров и заканчивая локальными структурами, имеющими в длину десятки или сотни метров. В процессе современного освоения геологической среды локальные тектонические структуры приобретают все более высокую значимость. Линейные зоны тектонических нарушений, как правило, выражаются в виде участков повышенной трещиноватости и раздробленности пород.

При строительстве зданий и сооружений, ведении горных работ и решении гидрогеологических задач особого внимания требуют локальные разломы, размеры которых сопоставимы с размерами инженерных объектов. Линейные зоны дробления определяют устойчивость скальных массивов при заложении строительных котлованов, откосов и горных выработок. Присутствие подземных вод в скальных породах определяется наличием открытых проницаемых трещин. Поиск и изучение тектонических разломов нередко становятся основной задачей при выполнении многих видов гидрогеологических исследований [5–7].

При изучении тектонических нарушений недостаточно применять упрощенный подход, который заключается в их простом выделении, описании и учете. Для успешного решения практических задач необходимо правильное понимание природы тектонических разломов как самостоятельных геологических тел. Ключевыми вопросами при изучении тектонических нарушений являются показатели, характеризующие современное напряженно-деформированное состояние (НДС) в конкретном участке земной коры [8–10].

Следует опираться на представления о существовании скальных массивов в состоянии предельного геомеханического равновесия. Очень важно учитывать роль тектонических разломов как регуляторов геомеханических процессов, поддерживающих состояние предельного равновесия.

В соответствии с современными представлениями [11–13], напряженное состояние земной коры является нормальным условием ее существования. Наличие значительных тектонических напряжений в верхней части земной коры установлено многими независимыми исследователями при изучении напряженного состояния породных массивов в подземных горных выработках [11, 14]. В приповерхностной части геологического разреза напряженно-деформированное состояние проявляется наличием горизонтальных тектонических напряжений, существенно превышающих вертикальные геостатические напряжения от веса горных пород. Напряжения, превышающие напряжения от веса горных пород, называются тектоническими, геодинамическими или избыточными.

Природа напряженного состояния земной коры на сегодняшний день не имеет однозначного объяснения. Некоторые специалисты связывают наличие тектонических напряжений с процессами конвективного массопереноса в верхнем слое мантии. Вследствие конвективных явлений происходит горизонтальное движение (фактически – плавание) тектонических плит и их силовое взаимодействие. Часть исследователей связывает наличие и вариации значений избыточных напряжений с влиянием лунных и солнечных циклов [1, 10, 13].

Отдельного внимания заслуживает представление о земной коре как о прочной оболочке, воспринимающей напряжения от собственного веса. По аналогии с реакцией бокового отпора, возникающей в арочном своде, в земной коре формируются горизонтальные геодинамические напряжения. Ряд исследователей связывает векторный характер НДС с ускорением или замедлением вращения планеты в различные геологические эпохи [10, 13]. Следует признать, что ни одна из перечисленных гипотез не может полностью исключить другие представления. В качестве главного источника тектонических напряжений в большинстве гипотез рассматриваются силы гравитации.

Напряженное состояние земной коры предопределяет существование породных массивов в условиях постоянного сжатия, поскольку сама природа гравитационных сил является сжимающей. Под действием глобальных тектонических напряжений породные массивы испытывают деформации. Тектонические разломы и трещины являются результатом таких деформаций. Следовательно, разломы следует рассматривать как структуры разрушения скальных массивов. Эти структуры формируются при условиях, когда действующие напряжения превышают прочностные свойства горных пород. Сети трещин, которые практически всегда фиксируются в породных массивах, следует рассматривать как тектонические структуры предразрушения. Массовые трещины предразрушения отражают реакцию горных пород на воздействие напряжений ниже предельных (разрушающих), но близких к ним [8].

Деформация породных массивов представляет собой нормальную реакцию горных пород на воздействие тектонических напряжений, определяющую процесс понижения напряжений и поддержания состояния предельного равновесия. Избыточные напряжения понижаются (сбрасываются) в результате разрушающих (предразрушающих) деформаций, ведущих к образованию трещин, заложению тектонических нарушений или смещений по разломам. Глобальная природа избыточных напряжений, наведенных силами гравитации, предопределяет бесконечность этого процесса. Тектонические напряжения в скальных массивах постоянно разгружаются путем деформаций разной интенсивности и различного уровня, но при этом никогда не могут быть исчерпаны полностью. Отсюда следу-

ет важное условие существования породных массивов в состоянии предельного равновесия (предельного напряженного состояния).

Практически в каждом скальном массиве постоянно поддерживается определенный уровень напряжений, который диктуется его прочностными характеристиками. В прочных (крепких) массивах этот уровень может быть выше, чем в массивах, сложенных менее прочными горными породами. Как только напряженное состояние превышает прочностные характеристики породного массива, оно сразу же реализуется в виде деформаций. Участки земной коры, которые слагаются породными массивами разной прочности, формируют саморегулирующуюся систему блоков (матрицу) массивов горных пород. Основой этой системы является сеть блоков (опорная матрица) примерно одинаковой прочности, которые взаимодействуют между собой и поддерживают определенный уровень тектонических напряжений на конкретном участке земной коры. Блоки (массивы), которые обладают существенно меньшими прочностными свойствами, подвергаются разрушительным деформациям. Эти массивы отличаются повышенной трещиноватостью и значительным количеством активных разломов. Массивы горных пород, которые отличаются от блоков опорной матрицы более высокими прочностными свойствами, деформируются относительно слабо. Трещины в этих блоках развиваются главным образом вблизи поверхности земли. Примером этих массивов на Урале могут служить дайки интрузивов кислого состава.

Накопление значительных тектонических напряжений происходит в тех участках земной коры, где по каким-либо причинам невозможен их постепенный сброс путем микросмещений по существующей сети трещин и тектонических нарушений. В этом случае тектонические напряжения достигают высоких значений, что существенно повышает риск резкого высвобождения энергии в виде землетрясений. Сейсмическая опасность определяется не только (и не столько) свойствами некоторого участка земной коры обладать высокими напряжениями, сколько отсутствием на данном участке деформационных структур, способных вовремя понижать (сбрасывать) эти напряжения.

Таким образом, тектонические разломы являются природными регуляторами напряженного состояния земной коры, обеспечивающими деформацию скальных массивов и сброс избыточных тектонических напряжений. Понимание геомеханической роли тектонических разломов является ключом к изучению закономерностей их пространственного расположения.

Напряженное состояние породного массива может быть описано через силовые характеристики (напряжения) и ориентировку трех векторов главных нормальных напряжений. Три ортогональных вектора отражают ориентировку осей максимального σ_1 , промежуточного σ_2 и минимального σ_3 главных нормальных напряжений. Принимается условие $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Максимальное напряжение практически всегда является сжимающим. Аналогичную характеристику в большинстве случаев можно отнести и к промежуточному напряжению. Минимальное главное нормальное напряжение может быть как сжимающим, так и растягивающим.

При описании современного напряженного состояния земной коры некоторые исследователи допускают вольную ориентировку трех векторов главных нормальных напряжений в пространстве. Допускается, что векторы могут располагаться под некоторыми существенными углами к горизонтальной плоскости и к вертикали. Такие представления в большинстве случаев являются неверными. Один из трех векторов главных нормальных напряжений всегда должен совпадать с вектором силы тяжести как основной действующей силы в земной коре. Это предопределяет строго горизонтальную ориентировку двух других векторов.

Механизм формирования и активизации тектонических разломов под воздействием современных геодинамических напряжений в условиях предельно-напря-

женного состояния земной коры рассматривается в различных научных направлениях [1, 3, 8]. В зависимости от целей и практических задач исследований представления и основные понятия несколько меняются.

В соответствии с преобладающими представлениями геомеханики и тектонофизики [3, 8] тектонический разлом может рассматриваться как укрупненная трещина скола. Теоретический анализ и натурные испытания на образцах показывают, что в процессе сжатия трещина скола формируется под определенным углом α к направлению главного силового воздействия. В зависимости от типа деформации (хрупкая, пластичная) и свойств породы, которые характеризуются углом внутреннего трения φ , угол скола изменяет свое значение. Согласно теоретическим представлениям, подтвержденным многими экспериментами, плоскость скола при чисто хрупкой деформации располагается под углом $(45^\circ - \varphi/2)$ к оси максимального главного напряжения σ_1 , под углом $(45^\circ + \varphi/2)$ к оси минимального главного напряжения σ_3 , и параллельно оси промежуточного главного напряжения σ_2 . При хрупко-пластичной деформации угол скола приближается к величине $(90^\circ - \varphi)$, который рассматривается как угол пластического скольжения. Таким образом, ориентировка трех осей главных нормальных напряжений предопределяет положение в пространстве плоскости скола. Соответственно, современное напряженное состояние скальных массивов контролирует пространственную ориентировку трещин и тектонических разломов.

Характерные значения угла скола, получаемые при испытаниях образцов скальных пород на одноосное сжатие, укладываются в диапазон $\alpha = 25\text{--}40^\circ$. Испытания образцов под прессом чаще всего характеризуют условия хрупкого разрушения с некоторыми элементами пластической деформации. Следует заметить, что массивы скальных пород в естественных условиях склонны к проявлению существенных элементов пластических деформаций. Проявление элементов пластических деформаций в массивах скальных пород объясняется следующими причинами:

- длительным периодом силового воздействия на породный массив, способствующим возникновению вялотекущих (пластических) деформаций;
- анизотропией прочностных свойств, связанных с фациальной и петрографической изменчивостью, что предопределяет неравномерную деформацию массива;
- собственной историей формирования скального массива, определяющей наличие ранее образованных тектонических разломов и массовых трещин, способствующих плавной релаксации напряжений;
- изменением температуры и давления с глубиной, что влечет за собой изменение механических свойств горных пород в сторону повышения пластичности.

Углы скола в породных массивах имеют широкий диапазон значений в зависимости от соотношения хрупких и пластичных деформаций. Для хрупких тектонических нарушений сохраняется величина угла скола, отражающая условия разрушения в образце ($\alpha = 25\text{--}35^\circ$). Как правило, хрупкие тектонические разломы по своим параметрам близки к единичной трещине скола. Они представляют собой локальные структуры мощностью не более нескольких метров и протяженностью до десятков метров.

Если при заложении тектонического разлома или смещении по нему проявляется некоторая доля пластических деформаций, значения угла скола возрастают до $\alpha = 35\text{--}45^\circ$. Такие разломы можно называть пластично-хрупкими. Тектонические нарушения имеют мощность порядка первых десятков метров и преобладающую протяженность, составляющую сотни метров. В практике гидрогеологических и инженерно-геологических работ именно такие разломы составляют основной предмет исследований. Данное обстоятельство заставляет ориентироваться на значение угла скола, составляющее в среднем 40° .

Если при смещении вдоль разлома пластические деформации преобладают над хрупкими деформациями, то значения угла скола возрастают до $\alpha = 45\text{--}55^\circ$ и выше. Хрупко-пластичные разломы, как правило, представляют собой крупные тектонические нарушения с мощностью тектонического шва примерно 100 м и протяженностью до нескольких километров.

Пластичные деформации в чистом виде характеризуются относительно большим углом пластического скольжения ($\alpha = 60\text{--}70^\circ$). Реализация таких деформаций возможна по тектоническим разломам, заложение которых происходило в предшествующие геологические эпохи, а шов разлома заполнен глинистыми минералами. В современном поле напряжений древние разломы нередко располагаются под такими углами к осям главных нормальных напряжений, которые определяют их существование в состоянии стагнации либо способствуют протеканию пластических деформаций [6, 8].

Одним из важнейших условий формирования тектонических нарушений является геодинамическая этажность земной коры [2, 8]. Геодинамическая этажность земной коры определяет изменение ориентировки осей главных напряжений с глубиной, что служит основным фактором образования тектонических разломов различного кинематического типа (надвигов, сдвигов, сбросов).

Горизонтальные геодинамические напряжения преобладают над вертикальными геостатическими напряжениями от веса горных пород только в самой верхней части земной коры. Оси максимального и промежуточного главных нормальных напряжений (σ_1 и σ_2) в этой части геологического разреза располагаются горизонтально. Ось минимального главного нормального напряжения (σ_3) совпадает с вектором силы тяжести и имеет строго вертикальную ориентировку. Такая расстановка сил характеризует условия верхнего геодинамического этажа, в пределах которого формируются тектонические нарушения с надвиговой кинематикой смещения (рис. 1).

Напряжения от веса горных пород возрастают с глубиной, и в определенной точке (по глубине) величина вертикальных геостатических напряжений становится больше значения геодинамических напряжений по одной из горизонтальных осей. При этом геомеханическая роль вертикального напряжения меняется. Вертикальное напряжение приобретает роль промежуточного главного напряже-

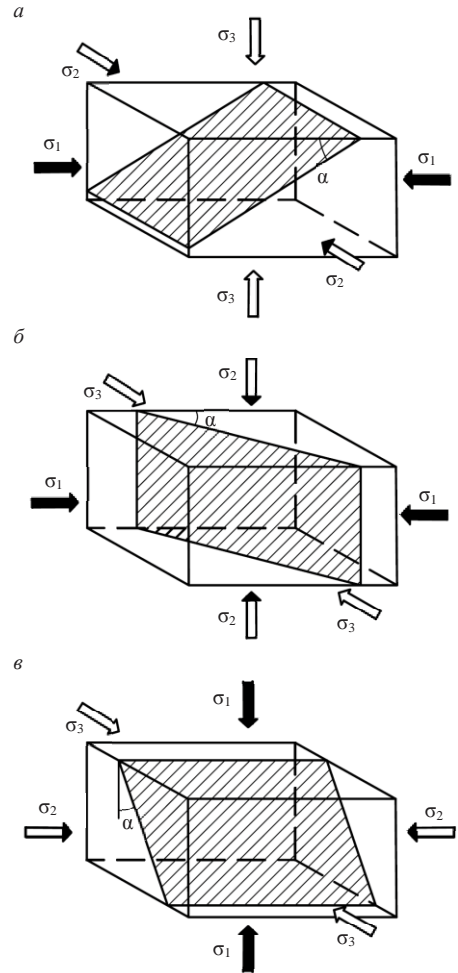


Рис. 1. Геодинамическая этажность верхней части земной коры. Формирование разломов в поле тектонических напряжений: *a* – верхний геодинамический этаж; *б* – промежуточный геодинамический этаж; *в* – нижний геодинамический этаж

Fig. 1. Distinctive features of geodynamic levels in the upper part of the Earth's crust. The formation of faults in the field of tectonic stresses:

a – upper geodynamic level; *б* – intermediate geodynamic level; *в* – lower geodynamic level

ния (σ_2), в то время как два горизонтальных вектора отражают ориентировку осей максимального (σ_1) и минимального (σ_3) главных нормальных напряжений.

Такая расстановка сил характеризует условия промежуточного геодинамического этапа, в пределах которого формируются тектонические разломы субвертикальной ориентировки со сдвиговой кинематикой смещения. Различают правые сдвиги, когда смещение вдоль тектонического шва происходит по часовой стрелке, и левые сдвиги, когда смещение вдоль тектонического шва происходит против часовой стрелки (рис. 1).

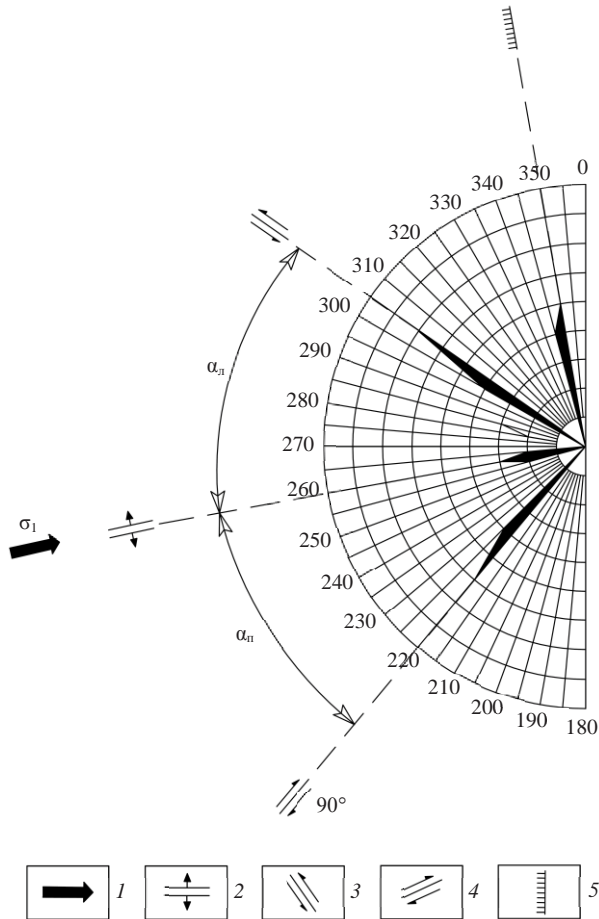


Рис. 2. Преобладающие ориентировки разломов в поле тектонических напряжений с азимутом ГМН 260° :

1 – действие ГМН; 2 – раздвиги и сбросы; 3 – левые сдвиги; 4 – правые сдвиги; 5 – взбросы; $\alpha_{л}$ – угол скола левых сдвигов; $\alpha_{п}$ – угол скола правых сдвигов

Fig. 2. Predominate orientations of faults in the field of tectonic stresses with MMS azimuth 260° :

1 – MMS action; 2 – tension cracks and faults; 3 – left displacements; 4 – right displacements; 5 – upthrow faults; $\alpha_{л}$ – left displacements taper angle; $\alpha_{п}$ – right displacements taper angle

Поскольку возрастание напряжения от веса горных пород с глубиной продолжается, на определенной глубине вертикальное геостатическое напряжение превышает величину геодинамических напряжений по обоим горизонтальным осям. Роль максимального главного напряжения переходит к вертикальному вектору напряжений. В свою очередь, два горизонтальных вектора отражают

положение осей промежуточного и минимального главных напряжений. Такая расстановка сил характеризует условия нижнего геодинамического этажа [8], в пределах которого формируются тектонические разломы сбросовой кинематики (рис. 1).

Таким образом, закономерное изменение напряженного состояния с глубиной приводит к формированию определенного «набора» тектонических нарушений в массиве горных пород. В приповерхностном слое земной коры образуются надвиги, смещение вдоль которых ориентировано в сторону земной поверхности,

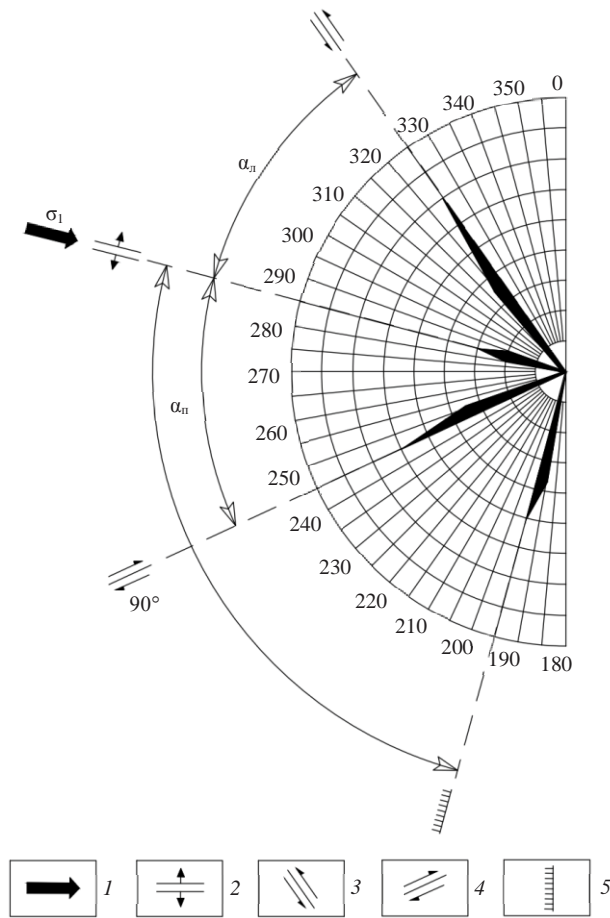


Рис. 3. Преобладающие ориентировки разломов в поле тектонических напряжений с азимутом ГМН 285°:

1 – действие ГМН; 2 – раздвиги и сбросы; 3 – левые сдвиги; 4 – правые сдвиги; 5 – взбросы; α_n – угол скола левых сдвигов; α_n – угол скола правых сдвигов

Fig. 3. Predominate orientations of faults in the field of tectonic stresses with MMS azimuth 285°:

1 – MMS action; 2 – tension cracks and faults; 3 – left displacements; 4 – right displacements; 5 – upthrow faults; α_n – left displacements taper angle; α_n – right displacements taper angle

являющейся границей нулевых тектонических напряжений или границей разгрузки напряжений. Ниже происходит заложение сдвигов, определяющих смещение породных блоков по горизонтали. В нижнем геодинамическом этаже происходит заложение сбросов, по которым происходят субвертикальные перемещения породных блоков. Несмотря на различную глубину заложения тектонических нарушений, разломы нижних этажей «прорезают» верхние этажи и обычно прояв-

ляются на земной поверхности. Это явление связано с определенной силовой иерархией геодинамических этажей [8].

Взаимное расположение тектонических разломов в пространстве можно наглядно показать при помощи розы-диаграммы. Для построения роз-диаграмм в реальных условиях используются данные геологического, инженерно-геологического и гидрогеологического картирования. Методика построения роз-диаграмм

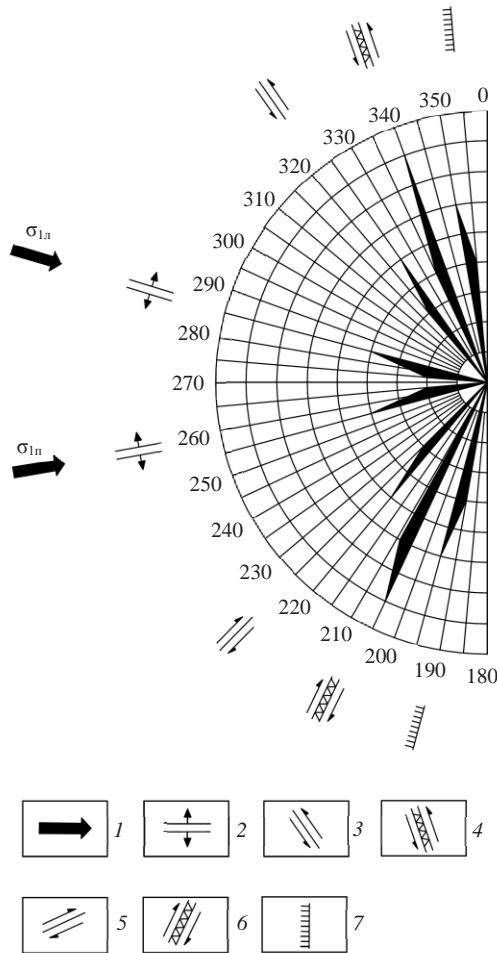


Рис. 4. Преобладающие ориентировки разломов в Уральском регионе:

1 – ориентировка основных ГМН; 2 – сбросы; 3 – левые хрупкие и пластично-хрупкие сдвиги; 4 – левые хрупко-пластичные сдвиги; 5 – правые хрупкие и пластично-хрупкие сдвиги; 6 – правые хрупко-пластичные сдвиги; 7 – взбросы

Fig. 4. Prevailing faults orientations in the Urals:
1 – orientation of basic MMS; 2 – faults; 3 – left brittle and elastic-brittle faults; 4 – left brittle-elastic faults; 5 – right brittle and elastic-brittle faults; 6 – right brittle-elastic faults; 7 – upthrow faults

заключается в суммировании относительных длин тектонических нарушений в пределах выбранных диапазонов азимутов простирания. В результате группы разломов преобладающей ориентировки формируют на диаграмме выраженные пики.

Результаты исследований. Анализ пространственной ориентировки тектонических нарушений выполнялся в рамках решения практических задач гидроге-

ологии, инженерной геологии и геомеханики на рудных месторождениях, месторождениях пресных подземных вод и на территории городов Северного, Среднего и Южного Урала [5, 6, 8, 14]. В ходе работ был выявлен ряд важных закономерностей. Установлено, что на разных территориях Урала выявляются три основных вида розы-диаграммы, отражающих преобладающие отличительные особенности ориентировки главных максимальных напряжений (ГМН). Главное максимальное напряжение, формирующее большинство активных тектонических разломов в современную геологическую эпоху, имеет два преобладающих направления (две ориентировки). На некоторых объектах основное направление ГМН действует по азимуту 260° . На других территориях преобладает ориентировка ГМН со средним азимутом 285° . Очень часто выявляются участки земной коры, на которых проявляются оба этих направления.

Вид розы-диаграммы, отражающей ориентировку ГМН по азимуту 260° , показан на рис. 2. Представлены пики, отражающие простирание сбросов, надвигов, левых и правых сдвигов. Простирание сбросов совпадает с ориентировкой оси максимального главного нормального напряжения, что соответствует закономерностям, связанным с геодинамической этажностью (рис. 1). Пик диаграммы, отражающий положение в пространстве надвиговых структур, располагается под прямым углом к оси ГМН и к пику диаграммы, определяющему ориентировку сбросов. Ориентировка надвигов имеет преобладающий азимут 350° . Два пика сдвиговых структур закономерно располагаются справа и слева от пика сбросовых нарушений и отстоят на угол скола, который чаще всего составляет 40° . Левые сдвиги имеют преобладающую среднюю ориентировку 300° , а сдвиги правой кинематики – 220° .

На некоторых объектах проявилось направление ГМН, действующее по азимуту 285° . В этом случае (рис. 3) простирание сбросов совпадает с ориентировкой оси ГМН, простирание надвигов имеет преобладающий азимут 15° (195°), два пика сдвиговых структур закономерно располагаются справа и слева от пика сбросов и отстоят на угол скола, который примерно составляет 40° . Левые сдвиги имеют преобладающую среднюю ориентировку 325° , а сдвиги правой кинематики – 245° .

На большинстве изученных объектов в различной степени выраженности проявляются два направления действия ГМН. В этих случаях диаграмма, отражающая ориентировку тектонических нарушений, имеет более сложную форму (рис. 4). В обобщающем варианте наблюдается взаимное наложение диаграмм, изображенных на рис. 2 и рис. 3. На обобщающей диаграмме пространственной ориентировки тектонических нарушений Уральского региона проявляются те же самые пики, соответствующие простиранию надвиговых, сдвиговых и сбросовых тектонических нарушений, эти пики как бы удваиваются. Имеется два пика, соответствующих простиранию сбросов, два пика, отражающих простирание надвигов, и четыре пика, соответствующих азимутам простирания сдвиговых нарушений (рис. 4).

При изучении объектов, где проявляются два направления действия ГМН, выявились особенности, которые отражают определенные отличия от простого наложения двух главных максимальных направлений. Главное максимальное направление с ориентировкой 285° формирует чаще всего левые по кинематике движения, хрупкие сдвиги со средним азимутом 320 – 325° и хрупко-пластичные сдвиги с азимутом 335 – 340° . ГМН с направлением 260° формирует чаще всего правые по кинематике движения, хрупкие сдвиги со средним азимутом 220 – 225° и хрупко-пластичные сдвиги с азимутом 205 – 210° . Эти данные заставляют полагать, что действующие попеременно ГМН делят сферы влияния на геологическую среду, и можно, с некоторой долей условности, рассматривать ГМН 285° как «левое» главное максимальное напряжение ($\sigma_{1л}$), а ГМН 260° – как «правое» ($\sigma_{1п}$).

Анализ результатов. Следует полагать, что описанная геодинамическая структура обусловлена закономерными природными вариациями предельно напряженного состояния скальных массивов. Так, два выраженных пика сбросовых нарушений свидетельствуют о возможном попеременном воздействии ГМН по двум смежным направлениям. Показательно, что эти направления отстоят друг от друга на угол, близкий к характерной величине хрупкого скола ($\alpha = 25\text{--}35^\circ$).

Концентрация тектонических напряжений происходит при отсутствии возможности их разгрузки путем деформации. При деформации массива под действием максимального главного напряжения по одному направлению может быть исчерпана возможность разгрузки напряжений путем смещения по существующим тектоническим швам. В этом случае возникает альтернативный вариант, когда вектор максимального главного нормального напряжения переключается на угол $25\text{--}35^\circ$. Сброс избыточных напряжений происходит по сети тектонических нарушений, сформированных по смежному направлению воздействия максимального напряжения, имеющего тот же набор деформационных структур.

Двойной набор тектонических структур создает возможность разнонаправленного смещения по одним и тем же тектоническим швам, позволяя максимально эффективно использовать существующую сеть разломов для релаксации избыточных напряжений. Например, при переключении силового воздействия на ориентировку 260° сбросы, заложенные под действием максимального напряжения по «старому» направлению 285° , оказываются расположенными под углом $25\text{--}30^\circ$ к новому положению оси максимального главного напряжения, и по ним могут реализовываться сдвиговые деформации.

Меняется характер деформации сдвиговых разломов. Так, угол между осью максимального напряжения и пластично-хрупкими левыми сдвигами с азимутами 320° увеличивается с 35 до 60° . Это приводит к увеличению вероятности пластических деформаций в плоскости тектонического шва. Угол между левыми хрупко-пластичными сдвигами с азимутами 340° возрастает до 80° . В результате по ним могут реализовываться надвиговые (взбросовые) смещения. С другой стороны, при переходе силового воздействия на ориентировку 260° , надвиги, заложенные под действием максимального напряжения по направлению 285° , оказываются расположенными под углом пластического скольжения к новому положению оси ГМН, и по ним могут реализовываться сдвиговые деформации.

Таким образом, вариации направления воздействия максимального главного нормального напряжения на угол $\alpha = 25\text{--}35^\circ$ очень существенным образом меняют картину деформации скального массива. Изменяется кинематика смещения вдоль плоскостей заложения тектонических разломов. Уменьшается или увеличивается доля хрупких и пластических деформаций в зоне тектонического шва. Обеспечивается более эффективная релаксация избыточных напряжений путем разнонаправленных смещений вдоль существующей сети тектонических нарушений.

Двойной набор тектонических структур, выступающих в роли подвижных элементов, увеличивает количество степеней свободы при деформации скального массива. Закономерное пространственное расположение тектонических разломов в породном массиве является его ответной реакцией на постоянное воздействие избыточных напряжений. Заложение закономерной сети тектонических разломов является элементом самоорганизации скального массива под воздействием внешних геодинамических сил.

Область применения результатов. Результаты геомеханического анализа современной геодинамической структуры скальных массивов Уральского региона показывают, что активные тектонические разломы, как правило, имеют определенную ориентировку в современном поле напряжений. Приведенные диаграм-

мы (рис. 2–4) с некоторыми незначительными вариациями повторяются при изучении большинства объектов. Современное поле напряжений испытывает вариации, выражающиеся в смене основного направления силового воздействия. Максимальное главное напряжение может переключаться на смежное направление воздействия, отстоящее на угол 25–35°. Существование двух основных направлений силового воздействия четко проявляется в пространственной ориентировке тектонических разломов.

Методика использования результатов зависит от цели конкретной работы. При поисковых работах, направленных на выявление участков, пригодных для питьевого и технического водоснабжения, исследования начинаются с камерального анализа картографических материалов. На этом этапе работ необходимо выявить достоверную структуру линеаментов конкретной местности. Желательно использовать широкий спектр карт: топографические, геологические, космические, геоботанические и др. Как правило, полученные диаграммы имеют высокий уровень соответствия со структурами, изображенными на рис. 2–4. На основании соответствия азимутальных ориентировок определяется кинематический тип предполагаемых разломов. Для поисков воды следует ориентироваться на сдвиги и сбросы, и, главное, на узлы их пересечения. На предполагаемых перспективных участках выполняется комплекс геофизических, буровых и опытных работ, направленных на подтверждение и детализацию тектонической и гидрогеологической структуры конкретного объекта исследований.

При инженерно-геологических изысканиях и для выявления причин деформации зданий и сооружений необходимо определить на аварийном участке местоположение, ориентировку и кинематический тип тектонических нарушений. Опираясь на предполагаемый кинематический тип разломов и вероятное направление деформации [8], следует с помощью методов высокоточной геодезии оценить интенсивность происходящих подвижек. Основную опасность представляют просадочные, реже – сдвиговые деформации. Эти деформации при своевременном выявлении и диагностике направления смещений можно компенсировать и предотвратить с помощью специальных методов. На этапе инженерно-геологических изысканий наиболее эффективные результаты может принести корректировка проекта, включающая изменение местоположения здания или сооружения.

Выводы. Для успешного решения практических задач необходимо правильное понимание природы тектонических разломов как самостоятельных геологических тел. Ключевыми вопросами при изучении тектонических нарушений являются показатели, характеризующие современное напряженно-деформированное состояние в конкретном участке земной коры. Тектонические разломы являются природными регуляторами напряженного состояния земной коры.

Деформация породных массивов представляет собой нормальную реакцию горных пород на воздействие тектонических напряжений и определяет процесс понижения напряжений и поддержания состояния предельного равновесия. Избыточные напряжения понижаются (сбрасываются) в результате разрушающих (предразрушающих) деформаций, ведущих к образованию трещин, заложению тектонических нарушений или смещений по разломам. Глобальная природа избыточных напряжений предопределяет бесконечность этого процесса.

Один из трех векторов главных нормальных напряжений всегда должен совпадать с вектором силы тяжести как основной действующей силы в земной коре. Это предопределяет в большинстве случаев строго горизонтальную ориентировку двух других векторов. При заложении тектонического разлома или смещении по нему проявляется некоторая доля пластических деформаций. В практике гидрогеологических и инженерно-геологических работ именно такие разломы составляют основной предмет исследований, что заставляет ориентироваться на значение угла скола, составляющее в среднем 40°.

Одним из важнейших условий формирования тектонических нарушений является геодинамическая этажность земной коры. Геодинамическая этажность земной коры предусматривает изменение ориентировки (изменение роли) осей главных напряжений с глубиной, что служит основным фактором образования тектонических разломов различного кинематического типа (надвигов, сдвигов, сбросов).

Главное максимальное напряжение (ГМН), формирующее большинство активных тектонических разломов в современную геологическую эпоху на Урале, имеет два преобладающих направления (две ориентировки). На некоторых объектах основное направление ГМН действует по азимуту 260° . На других территориях преобладает ориентировка ГМН со средним азимутом 285° . Очень часто выявляются участки земной коры, на которых проявляются оба этих направления.

При ориентировке ГМН по азимуту 260° простираение сбросов совпадает с ориентировкой оси максимального главного нормального напряжения, что соответствует закономерностям, связанным с геодинамической этажностью. Надвиговые структуры располагаются под прямым углом к оси ГМН, и ориентировка надвигов имеет преобладающий азимут 350° . Левые сдвиги имеют преобладающую среднюю ориентировку 300° , а сдвиги правой кинематики – 220° .

При ориентировке ГМН по азимуту 285° простираение сбросов совпадает с ориентировкой оси максимального главного нормального напряжения. Ориентировка надвигов имеет преобладающий азимут 15° (195°). Левые сдвиги имеют преобладающую среднюю ориентировку 325° , а сдвиги правой кинематики – 245° . При изучении объектов, где проявляются два направления действия ГМН, выявились особенности, которые имеют определенные отличия от простого наложения двух главных максимальных направлений.

Деформации скальных массивов и смещения вдоль тектонических разломов не являются хаотическими. Предельно напряженное состояние скальных массивов испытывает определенные вариации, но эти вариации имеют регулярный характер. Выявленные закономерности являются общими для Уральского региона. Следует предполагать, что закономерности пространственной ориентировки тектонических разломов являются важным условием существования скальных массивов в состоянии предельного равновесия и с некоторыми особенностями проявляются в других регионах.

Изучение пространственной ориентировки и геомеханической роли тектонических разломов имеет важное практическое значение. Геомеханические свойства тектонических нарушений определяют их проницаемость для подземных вод, инженерно-геологические характеристики скальных массивов и степень современной геодинамической опасности участков земной коры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артюшков Е. В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 302 с.
2. Тектонический кодекс России / Г. С. Гусев [и др.]. М.: Геокарт: Геос, 2016. 240 с.
3. Гончаров М. А., Талицкий В. Г., Фролова Н. С. Введение в тектонофизику. М.: КДУ, 2005. 496 с.
4. Бачманов Д. М., Рассказов А. А. Активность разрывных нарушений и некоторые черты геодинамики области сочленения Южного и Среднего Урала // Геотектоника. 2000. № 4. С. 25–31.
5. Лукьянов А. Е. Гидрогеомеханический анализ ориентировки водоносных тектонических структур в скальных породах // Известия вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 182–184.
6. Тагильцев С. Н., Осипова А. Ю., Лукьянов А. Е. Активные тектонические структуры и их выявление на строительном площадках // Уральский строитель. 2012. № 11–12. С. 31–33.
7. Tkachuk E. I. Regular vertical changeability of rock mass properties of filtration // Proceeding Sixth Int. Congress IEAG. 1990. Vol. 2. P. 1249–1252.
8. Тагильцев С. Н., Лукьянов А. Е. Геомеханическая роль тектонических разломов и закономерности их пространственного расположения // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. (12–14 октября 2011 г.). Екатеринбург, 2012. С. 26–39.
9. Zoback M. L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project // Journal of Geophysical Research. 1992. Vol. 97. No. B8. P. 11761–11782.

10. Шерман С. Н., Днепровский Ю. И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. С. 158.
11. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 207 с.
12. Тажибаев К. Т. Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород. Т. 1. Бишкек: Алтын Принт, 2016. 352 с.
13. Bird C. Planetary Grid // *New Age Journal*. 1975. No. 5. P. 36–41.
14. Тагильцев С. Н., Кибанова Т. Н. Закономерности поля тектонических напряжений в геологической среде Красноуральского рудного района // *Известия УГГУ*. 2017. Вып. 2. С. 43–47.

Поступила в редакцию 9 апреля 2018 года

Тагильцев С. Н. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 7. С. 52–66.

Сведения об авторах:

Тагильцев Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии Уральского государственного горного университета. E-mail: tagiltsev@k66.ru

REGULARITIES IN THE SPATIAL ARRANGEMENT OF TECTONIC DISTURBANCES IN THE FIELD OF MODERN STRESS STATE OF THE EARTH'S CRUST

Tagil'tsev S. N.¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Research aim. The main aim of the present research is to determine spatial regularities in the arrangement of tectonic disturbances which are active in modern field of geodynamic stresses. Tectonic faults are considered as the structures of hard rock masses breaking which occur under the Earth's crust stresses exceeding the strength characteristics of the hard rocks. Tectonic faults are natural controllers of the Earth's crust stress state which ensure the deformation of the hard rocks and excessive tectonic stresses relieving. Modern activation of tectonic disturbances depends on the faults orientation in the field of modern geodynamic stresses acting within a definite section of the Earth's crust. The crust's geodynamic levels presence determines the variation of axes of the main stresses with the depth, which is the main factor of tectonic faults of various types (thrusts, displacements, and faults) generation.

Research results. The Ural hard rock masses modern geodynamic structure analysis shows that active tectonic faults have definite orientation in modern field of stresses. The main maximum stress (MMS) which forms the majority of active tectonic faults in the modern geological age in the Urals has two predominate directions (two orientations). At some facilities the main direction of MMS acts in azimuth 260°. At the other territories, MMS orientation prevails with an average azimuth 285°. Very often the sections of the Earth's crust are distinguished where both directions appear.

Modern stress field undergoes definite variations which are expressed in the power action main direction variation. The presence of the two main directions of the power action manifests in the spatial orientation of tectonic faults. The existence of a regular network of faults is an element of a hard rock mass self-organization under the impact of the Earth's crust tectonic stresses.

Research results application area. The study of the spatial orientation and geomechanical role of tectonic faults is of a great practical significance. Geomechanical properties of tectonic disturbances determine their permeability for subsoil waters, engineering-geological characteristics of hard rock masses, and the degree of modern geodynamic hazard of the Earth's crust sections.

Key words: tectonic faults; stress state of the Earth's crust; modern tectonic activation; geodynamic floors presence; main maximum stresses orientation.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7-52-66

REFERENCES

1. Artiushkov E. V. [Physical tectonics]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 302 p.
2. Gusev G. S., Mezhelevskii N. V., Gushchin A. V., and others [Tectonic code of Russia]. Moscow, Geocart: Geos Publ., 2016. 240 p.
3. Goncharov M. A., Talitskii V. G., Frolova N. S. [Introduction to tectonophysics]. Moscow, KDU Publ., 2005. 496 p.
4. Bachmanov D. M., Rasskazov A. A. [Fractures activity and some features of geodynamics at the area of the Southern and the Middle Urals joint]. *Geotektonika – Geotectonics*, 2000, no. 4, pp. 25–31. (In Russ.)
5. Luk'ianov A. E. [Hydrogeomechanical analysis of water-bearing tectonic structures orientation in hard rocks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2008, no. 8, pp. 182–184. (In Russ.)

6. Tagil'tsev S. N., Osipova A. Iu., Luk'ianov A. E. [Active tectonic structures and their exposure at construction sites]. *Ural'skii stroitel' – Ural Builder*, 2012. no. 11–12, pp. 31–33. (In Russ.)
7. Tkachuk E. I. Regular vertical changeability of rock mass properties of filtration. Proceeding Sixth Int. Congress IEAG, 1990, vol. 2, pp. 1249–1252.
8. Tagil'tsev S. N., Luk'ianov A. E. [Geomechanical role of tectonic faults and regularities in their spatial arrangement]. [Proc. of the Research. to Pract. Conf. (12th–14th October, 2011) "Geomechanics in Mining"]. Ekaterinburg, 2012, pp. 26–39. (In Russ.)
9. Zoback M. L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project. *Journal of Geophysical Research*, 1992, vol. 97, no. B8, pp. 11761–11782.
10. Sherman S. N., Dneprovskii Iu. I. [The Earth's crust stress fields and geological-structural methods of their investigation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, 158 p.
11. Vlokh N. P. [Rock pressure control at underground mines]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 207 p.
12. Tazhibaev K. T. [Stresses, rock dynamic breaking and deformation processes. Vol. 1]. Bishkek, Altyn Print Publ., 2016. 352 p.
13. Bird C. Planetary Grid. *New Age Journal*, no. 5, 1975, pp. 36–41.
14. Tagil'tsev S. N., Kibanova T. N. [Regularities in the field of tectonic stresses in geological environment of Krasnotur'insky ore district]. *Izvestiya Ural'skogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta – News of the Ural State Mining University*, 2017, issue 2, pp. 43–47. (In Russ.)

Information about authors

Tagil'tsev Sergei Nikolaevich – Doctor of Engineering Science, Professor, head of the Department of Hydrogeology, Engineering Geology, and Geoecology, Ural State Mining University.
E-mail: tagiltsev@k66.ru
