ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(5—1):145—157
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.83+556.343 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_145

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

С. Н. Тагильцев[1], **Т. Н. Кибанова**[1], **В. С. Тагильцев**[1], **С. В. Сурганов**[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: фильтрационная структура скальных массивов палеозойского возраста в значительной степени определяется современными тектоническими процессами. Движение подземных вод может происходить только по сетям взаимосвязанных открытых трещин, сохраняющих проницаемость в связи с постоянными силовыми процессами в верхней части земной коры. Закономерности тектонических движений и современного напряжённо-деформированного состояния породных массивов изучаются в научных направлениях «геомеханика» и тектонофизика». Формирование проницаемости в скальных породах и закономерности расположения водоносных зон в геологических структурах, связанных с тектоническими процессами, является предметом изучения научного направления «гидрогеомеханика скальных массивов». Практика гидрогеологических работ в районах, сложенных древними скальными породами показывает, что высокой проницаемостью отличаются тектонические нарушения, подвижные (активные) в современном поле тектонических напряжений. Подвижность тектонических разломов зависит от расположения определённых типов разрывных нарушений в поле современных геодинамических напряжений. Гидрогеомеханические исследования, выполняемые на конкретных объектах, следует начинать с определения ориентировки векторов главных максимальных напряжений (ГМН). Исследования, выполненные в Уральском регионе показали, что в большинстве случаев ГМН имеют две преобладающие субширотные ориентировки — 260° и 285°. В поле действия этих напряжений наибольшей водоносностью отличаются сдвиговые субвертикальные тектонические нарушения, образующие с вектором ГМН средний угол 40°. Для основных водоносных сдвигов характерно простирание 220° и 305—325°. Необходимо учитывать пространственные закономерности в расположении активных тектонических нарушений, и широко применять методические приёмы гидрогеомеханики в гидрогеологической практике.

Ключевые слова: геомеханика, гидрогеомеханика скальных массивов, напряжённо-деформированное состояние, главное максимальное напряжение, активные разломы, фильтрационная структура, кинематические типы разломов, сдвиги, водоносность тектонических нарушений, линеаменты.

Для цитирования: *Тагильцев С. Н., Кибанова Т. Н., Тагильцев В. С., Сурганов С. В.* Геомеханический анализ гидрогеологических свойств тектонических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5—1. — С. 145—157. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_145.

© С. Н. Тагильцев, Т. Н. Кибанова, В. С. Тагильцев, С. В. Сурганов. 2022

Geomechanical analysis of the hydrogeological properties of tectonic fault

S. N. Tagil'tsev[1], **T. N. Kibanova**[1], **V. S. Tagil'tsev**[1], **S. V. Surganov**[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract: the filtration structure of Paleozoic rock masses is largely determined by modern tectonic processes. The movement of groundwater can only occur through networks of interconnected open cracks that retain permeability due to constant force processes in the upper part of the earth's crust. The patterns of tectonic movements and the current stress-strain state of rock masses are studied in the scientific areas of "geomechanics" and "tectonophysics". The formation of permeability in rocks and the regularities of the location of aquifers in geological structures associated with tectonic processes is the subject of study of the scientific direction "hydrogeomechanics of rock massifs". The practice of hydrogeological work in areas composed of ancient rocks shows that tectonic faults that are mobile (active) in the modern field of tectonic stresses are characterized by high permeability. The mobility of tectonic faults depends on the location of certain types of faults in the field of modern geodynamic stresses. Hydrogeomechanical studies performed on specific objects should begin with determining the orientation of the vectors of the main maximum stresses (PMS). Studies carried out in the Ural region have shown that in most cases HMNs have two predominant sublatitudinal orientations — 260° and 285°. In the field of action of these stresses, shear subvertical tectonic faults are characterized by the highest water content, forming an average angle of 40° with the HMF vector. The main aquifers are characterized by a strike of 220° and 305—325°. It is necessary to take into account the spatial regularities in the location of active tectonic disturbances, and to widely apply the methodological methods of hydrogeomechanics in hydrogeological practice.

Key words: geomechanics, hydrogeomechanics of rock massifs, stress-strain state, main maximum stress, active faults, filtration structure, kinematic types of faults, shifts, water content of tectonic faults, lineaments.

For citation: Tagil'tsev S. N., Kibanova T. N., Tagil'tsev V. S., Surganov S. V. Geomechanical analysis of the hydrogeological properties of tectonic fault. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5—1):145—157. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_145.

Введение

В регионах, в которых преобладают скальные породы, водоносность породных массивов связана с зонами развития открытых тектонических трещин [1, 2]. Для поисков водоносных тектонических нарушений применяются геоморфологические, структурно-геологические и различные геофизические методы [3, 4]. При выполнении поисково-разведочных работ с целью рационального заложения гидрогеологических скважин, предназначенных для водоснабжения или дренажа горных выработок, хорошие результаты достигаются при использовании теоретических представлений, учитывающих напряжённо-деформированное состояние (НДС) геологической среды [5, 6]. На стыке гидрогеологии, тектонофизики и геомеханики сформировалось новое научное направление — «гидрогеомеханика скальных массивов».

Гидрогеомеханика изучает закономерности формирования фильтрационной структуры скальных массивов под воздействием современных геодинамических (тектонических) напряжений. Гидрогеологические исследования, выполненные в горно-складчатых реги-

онах показывают, что проницаемость горных пород в зонах тектонических нарушений, подвижных (активных) в современном поле геодинамических напряжений, существенно выше, чем фоновые показатели породного массива [7]. Поэтому важной частью гидрогеомеханических исследований является определение основных характеристик поля тектонических напряжений, в первую очередь — выявление ориентировки векторов главных максимальных напряжений, действующих в конкретном массиве горных пород, с последующей оценкой современной активности выявленных разломов [8].

Гидрогеомеханика тектонических нарушений

Активизация (современная подвижность) разломов определяется ориентировкой нарушений в поле тектонических напряжений, действующих в определённом массиве горных пород. Очень важным положением гидрогеомеханики является принцип современности в анализе активных тектонических (гидрогеологических) структур [9, 10]. Активные разломы в рельефе нередко дешифрируются как линеаменты [2, 7, 11]. В общегеологических представлениях «современные явления и структуры» соотносятся с периодами в тысячи лет и более. При анализе тектонической ситуации в отношении гидрогеологических и инженерно-геологических явлений очень часто понятие «современные процессы» следует понимать буквально, т.е. рассматривать как происходящие на наших глазах или в очень недалёком прошлом (десятки лет). Особо важен принцип современности при изучении и анализе природно-техногенных геомеханических явлений и процессов.

Анализ и выявление пространственного положения векторов главных максимальных напряжений (ГМН) выполняются, главным образом, на различных месторождениях твёрдых полезных ископаемых. Исследования производятся геомеханическими [8] и структурно-геологическими методами [3—5]. Разносторонний анализ данных, позволяющий определить ориентировку ГМН, указывает на существование в настоящее время двух основных направлений действия главных максимальных напряжений. Обобщение результатов, полученных различными организациями и исследователями показало, что в пределах Уральского региона образование и активизация тектонических нарушений и открытых трещин происходит, чаще всего, под воздействием двух преобладающих ГМН, имеющих средние ориентировки 260° и 285° [1, 12].

В настоящее время оба этих направления действуют практически одновременно, с вариациями во времени и по изучаемым участкам. Преобладающие ориентировки (азимуты простирания ГМН) варьируют, как правило, в пределах погрешности в 5–10°. Закономерности изменения (чередования) в пространстве и во времени основных ориентировок ГМН достоверно не выявлены. Анализ данных по различным регионам России позволяет полагать, что указанные ориентировки ГМН характерны не только для Уральского региона [12—14]. В разных массивах горных пород могут выявляться участки с преобладанием одного из указанных направлений. Нередко фиксируется совместное действие основных ориентировок ГМН на определённом участке земной коры, которое проявляется в виде характерных ориентировок тектонических структур [1, 5].

В поле тектонических напряжений главное максимальное напряжение действует совместно с промежуточ-

ным и минимальным главными нормальными напряжениями (ГНН) [5, 14, 15]. Главные нормальные напряжения меняют свою геомеханическую роль с глубиной по геологическому разрезу. Вертикальное главное нормальное напряжение, которое формируется главным образом за счёт веса горных пород, в зоне тектонических напряжений, по мере увеличения глубины, последовательно изменяет свою роль от минимального к максимальному напряжению (ГМН). Соответственно, роль напряжений, ориентированных горизонтально, также меняется. Главное максимальное напряжение, преобладающее в верхней части геологического разреза, на определённой глубине приобретает роль промежуточного ГНН. Изменение роли главных нормальных напряжений с глубиной вызывает формирование геодинамической этажности в верхней части земной коры [5, 15]. Каждый геодинамические этаж формирует определенную генерацию (совокупность) тектонических нарушений (рис. 1).

Ориентировка главных нормальных напряжений в верхнем геодинамическом этаже предопределяет формирование надвигов (взбросов). Простирание надвигов ориентировано перпендикулярно направлению действия ГМН, и поэтому, надвиги обычно имеют субмеридиональное простирание. Средний геодинамический этаж формирует сдвиги, которые могут быть левой или правой кинематики. Нижний геодинамический этаж генерирует образование сбросов, которые ориентированы параллельно оси ГМН, действующего вблизи земной поверхности (в верхнем геодинамическом этаже) и, чаще всего, имеют субширотную ориентировку. Таким образом, каждое из преобладающих ГМН (260° или 285°) может формировать четыре основных вида тектонических разломов (надвиги, левые и правые сдвиги, сбросы). Все указанные виды тектонических нарушений выявляются и «работают» на дневной поверхности.

Сдвиги являются наиболее распространённым видом тектонических нарушений, и отличаются от других видов разломов тем, что имеют субвертикальное падение. Сдвиги образуют с осью ГМН угол скола, который варьирует в довольно широких пределах и зависит от того, какой вид деформации (хрупкой или пластичной) преобладает при формирование сдвига. Сдвиги с преобладающей хрупкой деформацией образуют с осью ГМН угол от 25 до 35°, а при сочетании пластичной и хрупкой деформации угол скола возрастает и может достигать 60°.

Угол скола чаще всего составляет 35–45°, что характерно для пластично-хрупких сдвигов. Существенно реже выявляется угол скола в 45–55°, что характерно для хрупко-пластичных сдвигов. В структурной геологии и тектонофизике сдвиги принято разделять на сдвиги левой кинематики («левые») и сдвиги правой кинематики («правые»). В поле напряжений края (борта) правого сдвига испытывают относительное движение по часовой стрелке. Борта левых сдвигов испытывают относительное движение против часовой стрелки.

Для разломов, которые формируются под воздействием ГМН с азимутом ориентировки 260°, характерны определенные азимуты простирания основных типов тектонических нарушений. Взбросы, как структуры расположенные перпендикулярно вектору действия ГМН, имеют среднее простирание 350°, а правые сдвиги — 220°. Левые сдвиги этой генерации встречаются реже, для них характерно среднее простирание 300 — 310°. Ориенти-

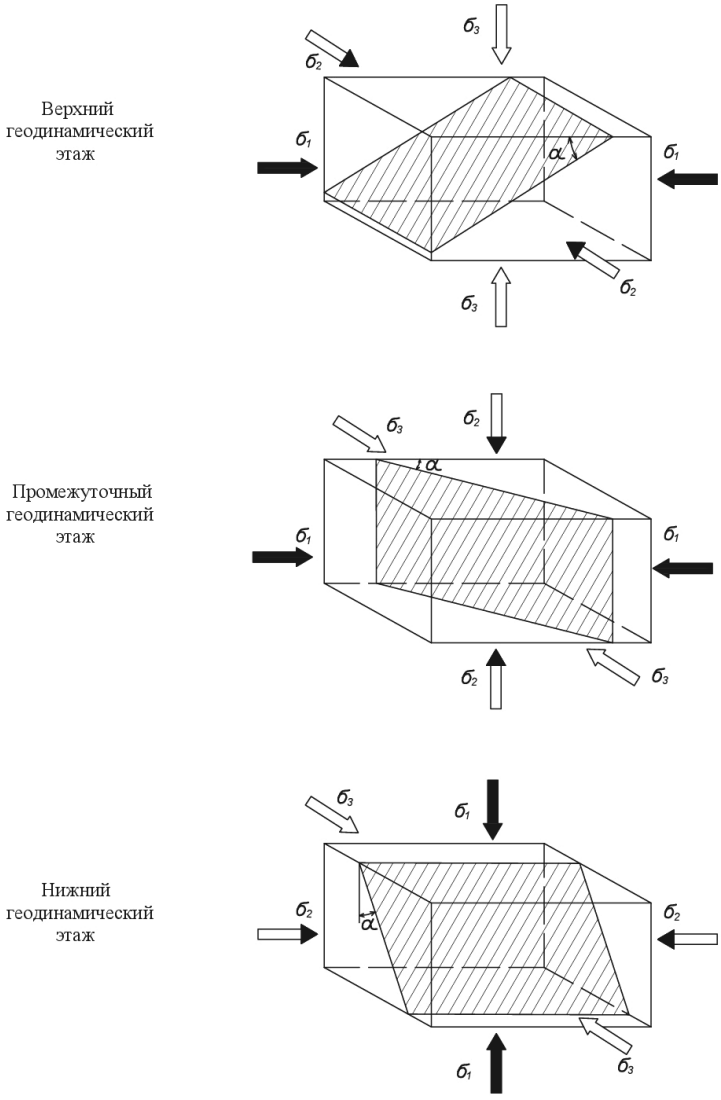

Рис. 1. Формирование разломов в поле тектонических напряжений: верхний этаж — надвиги, взбросы; промежуточный этаж — сдвиги; нижний этаж — сбросы. σ_1 — главное максимальное напряжение; σ_2 — главное промежуточное напряжение; σ_3 — главное минимальное напряжение
Fig. 1. Formation of faults in the field of tectonic stresses: upper floor — overthrusts, reverse faults; intermediate floor — shifts; lower floor — faults. σ_1 — main maximum stress (MMS); σ_2 — main intermediate voltage; σ_3 — main minimum stress

ровка сбросов (раздвигов) совпадает с направлением действия ГМН (рис. 2).

В массивах горных пород, где преобладает главное максимальное напряжение, ориентированное по азимуту 285°, формируется своя генерация разломов [5]. Взбросы (надвиги) имеют простирание по азимуту 15° (195°). Левые сдвиги, чаще всего, имеют ориентацию по азимуту 325°, а правые — 245°. Отклонения простирания разломов от средних значений обычно не пре-

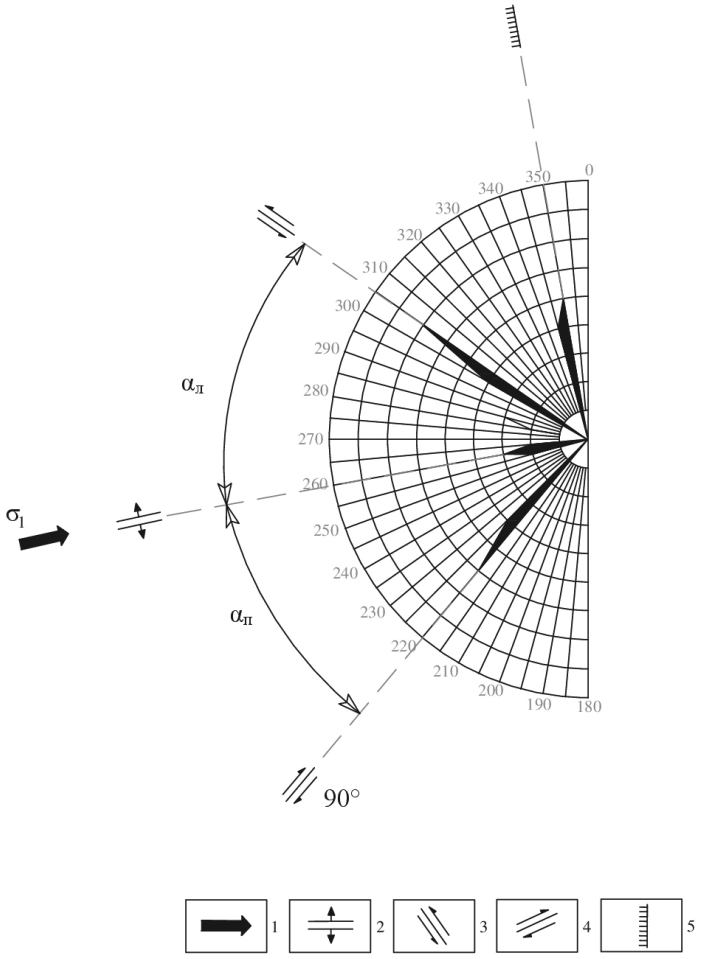

Рис. 2. Преобладающие ориентировки разломов в поле тектонических напряжений с азимутом ГМН 260°: 1 — действие ГМН; *2* — раздвиги и сбросы; *3* — левые сдвиги; *4* — правые сдвиги; *5* — взбросы; $\alpha_л$ — угол скола левых сдвигов; $\alpha_п$ — угол скола правых сдвигов
Fig. 2. Prevailing orientations of faults in the field of tectonic stresses with the azimuth of the MMS 260°: 1 — action of MMS; *2* — splits and faults; *3* — left shifts; *4* — right shifts; *5* — reverse faults; $\alpha_л$ — shear angle of left shifts; $\alpha_п$ — shear angle of right shifts

вышает 5—10° (рис. 3). Существенное отклонение от указанных значений характерно, как правило, для тектонических нарушений с заметным проявлением пластических деформаций. Хрупко-пластичные левые сдвиги имеют среднее простирание около 340°.

Следует отметить, что в большинстве породных массивов указанные ориентировки ГМН действуют совместно (с вариациями по времени), и очень часто выявляется комплексный рисунок разломов. Совместное воздействие ГМН имеет определённые характерные черты. Например, ГМН с азимутом 285° формирует, чаще всего, левые сдвиги, а ГМН с азимутом 260° — правые сдвиги.

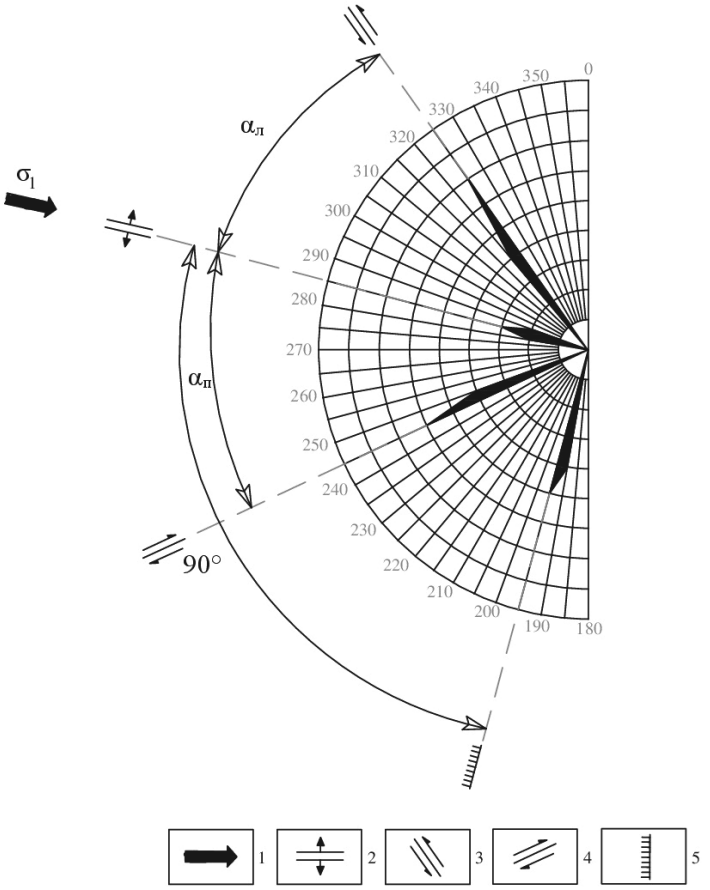

Рис. 3. Преобладающие ориентировки разломов в поле тектонических напряжений с азимутом ГМН 260°: 1 — действие ГМН; *2* — раздвиги и сбросы; *3* — левые сдвиги; *4* — правые сдвиги; *5* — взбросы; $\alpha_л$ — угол скола левых сдвигов; $\alpha_п$ — угол скола правых сдвигов

Fig. 3. Prevailing orientations of faults in the field of tectonic stresses with the azimuth of the MMS 285°: 1 — action of MMS; *2* — splits and faults; *3* — left shifts; *4* — right shifts; *5* — reverse faults; $\alpha_л$ — shear angle of left shifts; $\alpha_п$ — shear angle of right shifts

В целом, описанные закономерности в ориентировке разломов позволяют при анализе рисунка тектонических нарушений конкретного месторождения (участка, региона), выявлять ориентировку главных максимальных напряжений. Определение ориентировки ГМН даёт возможность, с высокой степенью достоверности, оценивать кинематические типы основных тектонических нарушений (сбросы, взбросы, сдвиги), которые выявляются при изучении конкретной территории [1, 5, 12].

При планировании и проведении поисково-разведочных гидрогеологических работ, применение основных положений и методических приёмов гидрогеомеханики позволяет повысить качество и результативность исследований. Выявление ориентировки главных максимальных напряжений

существенно повышает уровень диагностики кинематического типа тектонических нарушений и учитывает их гидрогеологические особенности.

Выявление наклонных разломов (сбросов и надвигов) ставит задачу оценки направления падения и определения угла падения плоскости разлома. Актуальность этой задачи связана с необходимостью расчёта оптимальной глубины, где планируется пересечение разведочной скважины с наиболее проницаемой зоной разлома. Соответственно, уточняется место (точка) расположения скважины. Следует исходить из предположения, что для получения максимального эксплуатационного дебита статический уровень в скважине должен располагаться выше водоносной зоны не менее чем на 10–20 м. Особенно это важно при исследованиях на маломощных хрупких разломах. Чаще всего таковыми являются надвиги.

Освоение водоносных зон, связанных со сдвигами, которые имеют субвертикальное падение, ставит задачу уточнения их реологических особенностей, т.е. оценку степени «хрупкости — пластичности» разлома [5]. Реологические особенности тектонических нарушений в значительной степени определяются литологическим составом вмещающих пород. Например, если метаморфизованные породы состоят из талька или хлорита, то проницаемость разломных зон будет очень низкой, т.к. массив горных пород состоит из минералов, имеющих пластические свойства. В большинстве случаев, которые встречаются на практике, массивы горных пород имеют относительно хрупкие или пластично-хрупкие свойства. Такими свойствами характеризуется большинство интрузивных, эффузивных и терригенных пород палеозойского возраста.

Оценку реологических особенностей разлома можно выполнять по двум основным признакам. Первый признак (азимут простирания) описан выше. Например, левые хрупкие сдвиги, генерируемые ГМН 260°, имеют азимут простирания 300–305°, а хрупко-пластичные характеризуются простиранием 315–320°. Второй признак степени «хрупкости — пластичности» разлома определяется мощностью тектонического нарушения. Мощность разлома зависит от свойств вмещающих пород, но можно отметить усреднённые показатели. Хрупкие разломы имеют мощность первые метры, обычно не более 5–10 м. Пластично-хрупкие сдвиги чаще всего характеризуются мощностью в первые десятки метров. Разломы, которые с определённой долей условности можно рассматривать как хрупко-пластичные, имеют условную среднюю мощность в районе ста метров и более.

С гидрогеологических позиций, при поисках подземных вод, следует ориентироваться на пластично-хрупкие и хрупкие сдвиги. Всё тело хрупкого разлома, как правило, отличается повышенной проницаемостью, но относительно небольшая мощность хрупких сдвигов требует внимательного отношения к расположению скважин. Сдвиги не всегда отличаются строгим вертикальным падением, поэтому есть вероятность при бурении скважины «выскочить» из разлома ещё в зоне аэрации. Наиболее разумный подход заключается в задании точки расположения скважины в осевой части хрупкого сдвига.

Пластично-хрупкие разломы обычно отличаются повышенной водоносностью, но распределение проницаемости по телу сдвига очень сильно варьирует в зависимости от литологического состава пород. В относительно

хрупких породах весь разлом может быть проницаемым, и, соответственно, водоносным. То же самое можно отметить и по карстующимся породам. Если литологический состав вмещающих пород имеет склонность к проявлению пластичных свойств, то проницаемые зоны разлома тяготеют к швам сдвига, причём не всегда к обоим. Нередко наибольшую активность (подвижность) проявляет один из бортов разлома. Такая ситуация требует применения дополнительных признаков повышенной проницаемости при оценке участка, а также целенаправленного использования геофизических методов.

Результаты гидрогеомеханических исследований в районе г. Златоуст

Проблема питьевого водоснабжения на юге Челябинской области стоит довольно остро. Для решения этой проблемы за счет подземных вод были выполнены поисковые гидрогеологические работы и выделены перспективные участки. Тектоническая обстановка, геологическое строение и гидрогеологические условия на площади Северного поискового участка создают благоприятные условия для постановки поисковых работ на подземные воды [1].

Массив горных пород в пределах поискового участка представлен метаморфическими биотит-амфиболовыми сланцами среднего рифея. Метаморфические породы разбиты на тектонические блоки различных размеров. Границами блоков являются тектонические нарушения, по которым происходит основная циркуляция подземных вод. Гидрогеологические и геофизические работы были направлены на поиски обводнённых разломов.

На этапе поисковых исследований применялись методы гидрогеомеханики и биолокации. Детальное описание методики биолокации, применённое на описываемом участке, представлено в работе [1]. Геофизические работы на этом участке проводились, в основном, методами электроразведки. На вертикальных картах кажущихся сопротивлений зоны повышенной проницаемости в массиве горных пород, как правило, соответствуют зонам пониженных электросопротивлений.

По результатам комплексных поисковых исследований были выбраны участки (точки) для бурения поисково-разведочных гидрогеологических скважин. Точки заложения скважин выбирались с точностью до первых метров. По результатам бурения и фильтрационного опробования скважин следует сделать вывод, что комплекс исследований, применённый при поисковых работах, подтвердил свою эффективность.

Откачки, выполненные в поисковых скважинах, дали следующие результаты: скв.1 — дебит 7,0 л/с., понижение уровня 5,80 м, удельный дебит 1,21 л/с.; скв.2 — дебит 7,0 л/с, понижение уровня 6,15 м, удельный дебит 1,14 л/с.; скв.3 — дебит 5,0 л/с., понижение уровня 7,40 м., удельный дебит 0,68 л/с. Значения удельного дебита по скважинам 1, 2, 3 превышают фоновые показатели для изучаемого горного массива примерно на порядок. Эти результаты позволяют считать, что расположение скважин относительно водоносных зон (выбор точек бурения), следует признать очень удачным.

С целью проведения углублённого гидрогеомеханического анализа было выполнено дополнительное обследование участка для уточнения расположения водоносных структур. Были получены ориентировки и схемы строения всех разломов, в которых находились скважины. Для определения

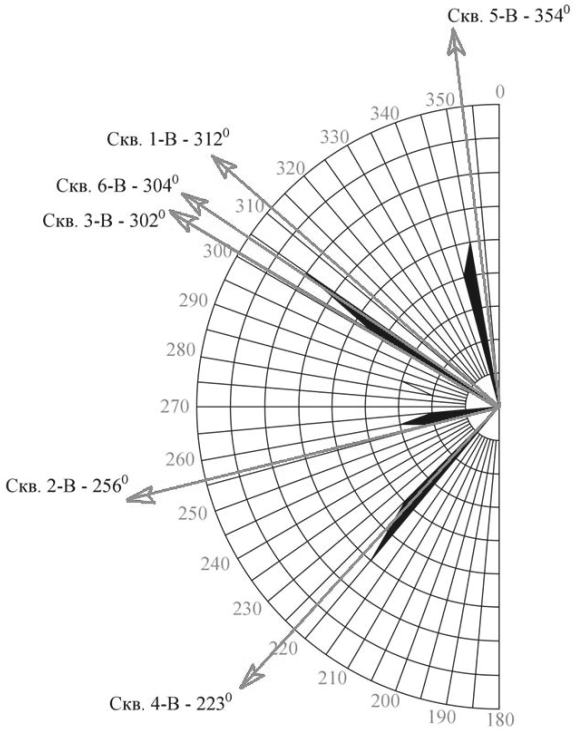

Рис. 4. Ориентировка тектонических нарушений, выявленных на поисковом участке
Fig. 4. Orientation of tectonic disturbances identified in the prospecting area

кинематического типа выделенных тектонических нарушений использовалась методические приёмы гидрогеомеханики скальных массивов [5, 12]. Ориентировка разломов, выявленных на изучаемом участке (рис. 4), полностью совпала с типовой схемой разломов, характерной для ГМН 260° (рис. 2). Наиболее обводнённые разломы связаны с хрупкими и пластично-хрупкими левыми сдвигами (скв. 1 и 3), а также со сбросом (скв. 2). Водоносность скважин, вскрывших правый сдвиг (скв. 4) и взброс (скв. 5) несколько ниже, но существенно превышает фоновые значения.

Таким образом, комплексное использование методов и представлений гидрогеомеханики, биолокации и электроразведки даёт возможность существенно повысить качество и эффективность гидрогеологических исследований. На этапе поисковых работ основные представления гидрогеомеханики позволяют оценить тектоническую структуру разломов, наметить ключевые участки и ориентировку будущих геофизических профилей, а также сформулировать содержание вопросов, которые должны решать, в последующем, геофизические исследования. Необходимо отметить, что результаты комплексного применения различных геофизических методов дают возможность количественно оценить степень водоносности и проницаемости изучаемых участков геологической среды.

Выводы

1. На территории регионов, сложенных скальными породами, водоносные зоны в массивах горных пород связаны с тектоническими нарушениями. Выявление водоносных разломов и их последующая гидрогеологическая детализация, с высокой степенью эффективности, возможны на основании применения методов гидрогеомеханики в комплексе с различными геофизическими методами.

2. Анализ ориентировки и мощности тектонических нарушений с использованием базовых представлений гидрогеомеханики даёт возможность уточнить кинематический и реологический тип разломных структур. Ориентировка главных максимальных напряжений и активных тектонических нарушений может быть выявлена в процессе поисковых исследований.

3. Детализация и анализ геофизических данных с позиций гидрогеомеханики позволяет оценить направление и угол падения тектонического нарушения, что существенно повышает эффективность заложения гидрогеологических скважин. Количественная интерпретация геофизических материалов также даёт возможность выявить наиболее обводнённые участки тектонических нарушений, которые очень часто связаны с местами пересечения разломов.

Вклад авторов

Тагильцев С. Н. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, написание текста и редакция статьи.

Кибанова Т. Н. — получение данных для анализа, написание текста статьи.

Тагильцев В. С. — анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Сурганов С. В. — выполнение работы по систематизации материала, подготовка данных, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тагильцев С. Н.*, *Чередниченко А. В.*, *Мельник В. В.* Комплексирование методов гидрогеомеханики, электроразведки и биолокации для выбора мест заложения гидрогеологических скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3—1. — С. 236–246. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0-236—246.

2. *Nayak S.*, *Mukhopadhyay B. P.*, *Mitra A. K.*, & *Chakraborty R.* Structural control on the occurrence of groundwater in granite gneissic terrain, purulia, west Bengal // Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(18) doi:10.1007/s12517—020—05853—2

3. *Шерман С. Н.*, *Днепровский Ю. И.* Поля напряжений земной коры и геолого–структурные методы их изучения. — Новосибирск: Наука, 1989. — С. 158.

4. *Menon R.*, *Mysaiah D.*, Senthil *Kumar P.*, & *Lakshmi K. J.* P. Structural analysis of lineaments surrounding the kailana-takhat sagar reservoir and its impact on rising ground water levels in jodhpur // Journal of the Geological Society of India, 2021, 97(6), pp. 596—602. doi:10.1007/s12594—021—1734-y

5. *Тагильцев С. Н.* Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры // Горный журнал. Изв. ВУЗов. — 2018. — № 7. — С. 52–66. DOI: 10.21440/0536—1028—2018—7-52—66

6. *Зубков А. В.*, *Сентябов С. В.* Деформация земной коры, способы изучения, закономерности, проблемы // Литосфера. 2020 (6), 863—872. https://doi.org/10.24930/1681—9004—2020—20—6-863—872

7. *Saint Jean Patrick Coulibaly, H., Talnan Jean Honoré, C., Naga, C., Claude Alain Kouadio, K., Régis Mailly DIDI, S., Diedhiou, A., & Savane, I*. Groundwater exploration using extraction of lineaments from SRTM DEM and water flows in béré region // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2021, 24(3), pp. 391—400. doi:10.1016/j.ejrs.2020.07.003

8. *Зубков А. В.* Закон формирования природного напряженного состояния земной коры // *Доклады Академии наук*. 2018 (3), С. 1–11

9. *Takam Takougang E. M., Ali M. Y., Bouzidi Y., Bouchaala F., Sultan A. A.*, & *Mohamed A. I*. Extraction and characterization of faults and fractures from 3D VSP data in a carbonate reservoir: A workflow // Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 182. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106328

10. *Sahu S. S.*, & *Mohanty S. P.* Demarcation of zones of neotectonic activity around regional faults: Morphometric analysis from the wagad highland, kachchh, india // Journal of Earth System Science, 2021, 130(4) doi:10.1007/s12040—021—01716-w

11. *Doski J. A.* H. Tectonic analysis of lineaments in the gara anticline, kurdistan, northern iraq // Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(6), 941—950. doi:10.1007/s12524—019—00940—8

12. *Тагильцев С. Н.*, *Панжин А. А.* Геомеханические закономерности горизонтальных и вертикальных деформаций массива горных пород в районе Качканарского железорудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3—1. — С. 247–257. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-247—257

13. *Гуляев А. Н.* Сейсмичность и сейсмическое районирование Урала // Горный журнал. Изв. ВУЗов. — 2016. — № 6. — С. 116—124.

14. *Тажибаев К. Т.* Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород. Бишкек: Алтын Принт, 2016. 352 с.

15. Тектонический кодекс России // Г. С. Гусев, Н. В. Межелевский, А. В. Гущин, В. А. Клипко, А. К. Корсаков, И. Н. Межеловский, М. В. Минц, А. Ф. Морозов, О. Н. Сироткина. — М.: Геокарт: Геос, 2016. — 240 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Tagiltsev S. N., Cherednichenko A. V., Melnik V. V. Integration of methods of hydrogeomechanics, electrical exploration and biolocation for choosing the locations of hydrogeological wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2020. no. 3-1. pp. 236—246. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0-236—246. [In Russ]

2. Nayak S., Mukhopadhyay B. P., Mitra A. K., & Chakraborty R. Structural control on the occurrence of groundwater in granite gneissic terrain, purulia, west Bengal. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(18) doi:10.1007/s12517-020-05853-2

3. Sherman S. N., Dneprovsky Yu. I. Stress fields of the Earth's crust and geological and structural methods of their study. Novosibirsk: Nauka, 1989. p. 158. [In Russ]

4. Menon R., Mysaiah D., Senthil Kumar P., & Lakshmi K. J. P. Structural analysis of lineaments surrounding the kailana-takhat sagar reservoir and its impact on rising ground water levels in jodhpur. *Journal of the Geological Society of India*, 2021, 97(6), pp. 596—602. doi:10.1007/s12594—021—1734-y

5. Tagiltsev S. N. Regularities of the spatial location of tectonic disturbances in the field of the modern stressed state of the Earth's crust. *Mining Journal. Izv. VUZov*. 2018. no. 7. pp. 52—66. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536—1028—2018—7-52—66

6. Zubkov A. V., Sentyabov S. V. Deformation of the earth's crust, methods of study, patterns, problems. *Litosfera*, 2020 (6), 863—872. [In Russ]. https:. doi.org/10.24930/1681—9004—2020—20—6-863—872

7. Saint Jean Patrick Coulibaly H., Talnan Jean Honoré C., Naga C., Claude Alain Kouadio K., Régis Mailly DIDI S., Diedhiou A., & Savane I. Groundwater exploration

using extraction of lineaments from SRTM DEM and water flows in béré region. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2021, 24(3), pp. 391 — 400. doi:10.1016/j.ejrs.2020.07.003

8. Zubkov A. V. *Zakon formirovaniya prirodnogo napryazhennogo sostoyaniya zemnoj kory* [The law of formation of the natural stress state of the earth's crust]. Doklady Akademii nauk. 2018 (3), pp. 1–11 [In Russ]

9. Takam Takougang E. M., Ali M. Y., Bouzidi Y., Bouchaala F., Sultan A. A., & Mohamed A. I. Extraction and characterization of faults and fractures from 3D VSP data in a carbonate reservoir: A workflow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 182 DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106328

10. Sahu S. S., & Mohanty S. P. Demarcation of zones of neotectonic activity around regional faults: Morphometric analysis from the wagad highland, kachchh, india. *Journal of Earth System Science*, 2021, 130(4) doi:10.1007/s12040 — 021 — 01716-w

11. Doski J. A. H. Tectonic analysis of lineaments in the gara anticline, kurdistan, northern iraq. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2019, 47(6), 941 — 950. doi:10.1007/s12524 — 019 — 00940 — 8

12. Tagil'tsev S. N., Panzhin A. A. Geomechanical regularities of horizontal and vertical deformations of a rock mass in the area of the Kachkanar iron ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; (3 — 1): 235 — 245. [In Russ] DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-247-257

13. Gulyaev A. N. Seismicity and seismic regionalization of the Urals. *Mining Journal. Izv. VUZov*. 2016. No. 6. pp. 116 — 124. [In Russ]

14. Tazhibaev K. T. Stresses, processes of deformation and dynamic destruction of rocks. Bishkek: Altyn Print, 2016. 352 p.

15. Tectonic code of Russia. G. S. Gusev, N. V. Mezhelevskii, A. V. Gushchin i dr. Moscow: Geokart: Geos, 2016. 240 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тагильцев Сергей Николаевич[1] — ORCID iD: 0000-0002-7289-3958, докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, tagiltsev@k66.ru;
Кибанова Татьяна Николаевна[1], ORCID iD: 0000-0001-5396-2826, доцент, канд. техн. наук, доцент, kibanova_1@mail.ru;
Тагильцев Викентий Сергеевич[1] — ORCID iD: 0000-0002-7923-6045, канд. геол.-минерал. наук, доцент, vikhgeo@gmail.com;
Сурганов Сергей Валерьевич[1] — ORCID iD: 0000-0002-3260-076X, старший преподаватель, surgsgig@yandex.ru;
[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, 620144, Россия, office@ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tagil'tsev S. N.[1], ORCID iD: 0000-0002-7289-3958, Dr. Sci. (Eng.), professor, position: head of department, tagiltsev@k66.ru;
Kibanova T. N.[1], ORCID iD: 0000-0001-5396-2826, docent, Cand. Sci. (Eng.), docent, kibanova_1@mail.ru;
Tagil'tsev V. S.[1], ORCID iD: 0000-0002-7923-6045, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), docent, vikhgeo@gmail.com.
Surganov S. V.[1], ORCID iD: 0000-0002-3260-076X, senior lecturer, surgsgig@yandex.ru.
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, 620144, Russia, office@ursmu.ru.

Получена редакцией 08.11.2021; получена после рецензии 01.03.2022; принята к печати 10.04.2022.
Received by the editors 08.11.2021; received after the review 01.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.