ЛИТОСФЕРА, 2010, № 2, с. 122–129

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 556.366+556.33

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАССЛОЕНИЕ СКАЛЬНОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

© 2010 г. С. Н. Тагильцев, А. Е. Лукьянов

Уральский государственный горный университет
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
E-mail: Luc_alex@inbox.ru

Поступила в редакцию 02.07.2009 г.

Фильтрационные свойства скальных пород зависят от наличия открытых проницаемых трещин. Открытые проницаемые трещины являются результатом деформации скального массива под действием избыточных горизонтальных тектонических напряжений. Роль вертикальных напряжений от веса горных пород в верхней части земной коры является второстепенной, но постепенно возрастает с глубиной, что приводит к вариациям напряженного состояния скальных массивов. Современное напряженное состояние земной коры предопределяет формирование фильтрационных свойств скальных пород. Поинтервальное гидрогеологическое опробование глубоких (650–1350 м) скважин показало, что изменение напряженного состояния с глубиной приводит к неравномерному развитию проницаемых трещин в разрезе и, как следствие, к формированию гидрогеологической стратификации массива скальных пород.

Ключевые слова: *скальный массив, современные тектонические напряжения, трещины, стратификация.*

Для Уральского региона характерно широкое развитие скальных пород. Активное многоцелевое освоение геологической среды делает необходимым изучение гидрогеологических свойств скальных пород как при разработке месторождений полезных ископаемых, так и при возведении инженерных сооружений и строительстве объектов глубокого заложения. Фильтрационные свойства скальных пород обусловлены наличием открытых проницаемых трещин и полностью зависят от пространственного расположения и геомеханических закономерностей образования массовых трещин в массивах скальных пород.

Скальные массивы на территории Урала в процессе длительной геологической истории переживали неоднократные периоды погружения на значительную глубину, прерываемые периодами поднятий и частичной денудации, подвергались метаморфизму и метасоматозу в условиях изменения температуры и давления. Поэтому первичная открытая трещиноватость палеозойских пород полностью утрачена. Нередко древние трещины залечены кристаллическим материалом, не уступающим по прочности вмещающим породам. Древние закрытые и залеченные трещины непроницаемы для подземных вод.

Открытая трещина не может возникнуть в скальной породе сама по себе. Трещина как результат деформации возникает вследствие силового воздействия на породный массив. Поскольку скальные породы обладают высокой прочностью, силы, формирующие массовую трещиноватость, должны иметь соответствующее количественное выражение. Простейшие расчеты показывают, что напряжения от веса горных пород в верхней части земной коры в зоне максимальной трещиноватости имеют минимальные значения и, как правило, не превышают предела прочности скальных пород. Соответственно, они не могут служить причиной возникновения трещин. Помимо этого, практически ни один экзогенный процесс не способен создать необходимых усилий для растрескивания прочной скальной породы. Экзогенные процессы требуют исходного наличия проницаемых трещин для проникновения различных агентов выветривания. В этом случае они могут расширять уже существующие трещины и разрушать только те скальные породы, которые ранее подверглись силовому воздействию, деформации и растрескиванию.

Единственным источником значительного силового воздействия на породные массивы в верхней части земной коры являются избыточные тектонические напряжения. По мнению ряда современных авторов, тектонические напряжения распространены в земной коре практически повсеместно. При этом вектор главного максимального напряжения имеет горизонтальную ориентировку [1–5, 7, 8]. Развитие массовых трещин в скальных массивах происходит, преимущественно, в пределах приповерхностной зоны хрупкой деформации и связано с действием современных горизонтальных тектонических напряжений.

Необходимо отметить, что теоретические основы движения подземных вод в трещинных коллекторах разработаны значительно слабее, чем законы фильтрации в пористых средах. Зачастую специалисты-гидрогеологи имеют ложные представления об особенностях фильтрационных свойств скальных по-

род. Как правило, проницаемость трещинных коллекторов напрямую связывают с количеством трещин. Однако практика показывает, что в природных условиях порой наблюдается обратная зависимость, когда с ростом трещиноватости проницаемость скальных пород существенно снижается. Это связано с тем, что проницаемость трещины, в соответствии с уравнением Буссинеска для открытой щели, находится в кубической зависимости от степени ее раскрытия. Если раскрытие трещины увеличивается в 2 раза, то ее проницаемость возрастает в 8 раз, т.е. почти на порядок. Таким образом, фильтрационные свойства трещинных коллекторов зависят в большей степени не от количества трещин, а от степени их раскрытия. При возрастании трещиноватости, как правило, снижается раскрытие трещин. Поэтому в сильно трещиноватых породах может сформироваться относительный водоупор.

Проницаемость скальных пород имеет следующие количественные выражения. Трещина с раскрытием 1 мм обладает водопроводимостью 50 м^2/сут. Среднее значение водопроводимости в скальных массивах Урала составляет 10 м^2/сут, а водопроводимость в пределах зон повышенной проницаемости около 100 м^2/сут. Это означает, что практически весь расход подземных вод, который мы получаем при откачке из любой скважины, пробуренной в скальных породах, поступает по одной трещине с раскрытием 1 мм или меньше. Кроме того, данная единичная проводящая трещина должна обладать достаточной протяженностью в породном массиве или быть связанной с другими открытыми трещинами, обеспечивающими фильтрацию подземных вод. Таким образом, наравне с раскрытием, существенное значение имеет взаимосвязь отдельных трещин в пределах трещинного водоносного горизонта.

Указанные представления показывают, что подземные воды в трещинных коллекторах движутся по тонким проводящим каналам, образующим сложную взаимосвязанную сеть. Такая система обладает чрезвычайно высокой чувствительностью к изменению геометрии проницаемого трещинного пространства. Даже небольшие вариации в раскрытии трещин или в изменении степени их взаимосвязи могут привести к существенному изменению фильтрационных свойств скального массива.

Проницаемая трещина, обладающая раскрытием в доли миллиметра, не может существовать в раскрытом состоянии длительное время. Открытая трещина теряет свою проницаемость вследствие действия геостатического (от веса вышележащих пород) и геодинамического (тектонического) давления и проявления скальными породами во времени пластических свойств. Закрытие трещин может происходить в результате осаждения минеральных солей, окислов железа и марганца или за счет кальматации глинистыми частицами. Процесс закрытия трещин может протекать с различной интенсивностью. Однако, время, за которое происходит закрытие трещин, в большинстве случаев несоизмеримо мало, по сравнению со временем существования самого породного массива. Длительное существование проницаемых зон на протяжении сотен и тысяч лет обеспечивается постоянной деформацией скальных массивов под действием современных тектонических сил, образованием и раскрытием новых трещин или подновлением старых. Как следствие, большинство проницаемых трещин имеют молодой возраст и их образование связано с современными геологическими процессами, протекающими в земной коре.

Таким образом, для исследования проницаемости трещинных коллекторов необходим комплексный подход, опирающийся на такие научные дисциплины, как геология, гидрогеология, структурная геология и геомеханика. Основные идеи и принципы данного подхода сформулированы в рамках научного направления “гидрогеомеханика скальных массивов” [5]. Изучение массовой трещиноватости на ряде месторождений Северного, Среднего и Южного Урала позволило выявить закономерное “волнообразное” изменение фильтрационных свойств с глубиной в относительно однородных скальных массивах, связанное с закономерным изменением напряженного состояния с глубиной [4]. Исследования последних лет позволяют дополнить указанные представления фактическими данными о гидрогеологическом расслоении скальных массивов в условиях современного напряженного состояния [6].

В 2007–2008 гг. на территории Петропавловского рудного поля были выполнены инженерно–геологические изыскания под проектируемые шахтные стволы. В задачи исследований входил расчет прогнозных водопритоков в вертикальные горные выработки. В процессе работ было пробурено четыре контрольно-стволовые скважины, глубина которых составила 650, 1250 и две по 1350 метров. Скважины располагались вдоль линии рудных тел север-северо-западного простирания на расстоянии 890, 175 и 1300 м друг от друга в соответствии с проектом будущего подземного рудника. Гидрогеологические исследования в контрольно-стволовых скважинах опирались на поинтервальное опробование. Длина интервалов опробования в кровле скального массива составляла 50 м, ниже глубины 200 м длина интервалов увеличивалась до 100–150 м.

Месторождение Юбилейное располагается на территории Петропавловского рудного поля, в 100 км южнее г. Сибай, республика Башкортостан, Южный Урал. В настоящее время, данное медное месторождение отрабатывается открытым способом, глубина действующего карьера достигла 150 м. В районе месторождения Петропавловское рудное поле имеет сложное геологическое строение.

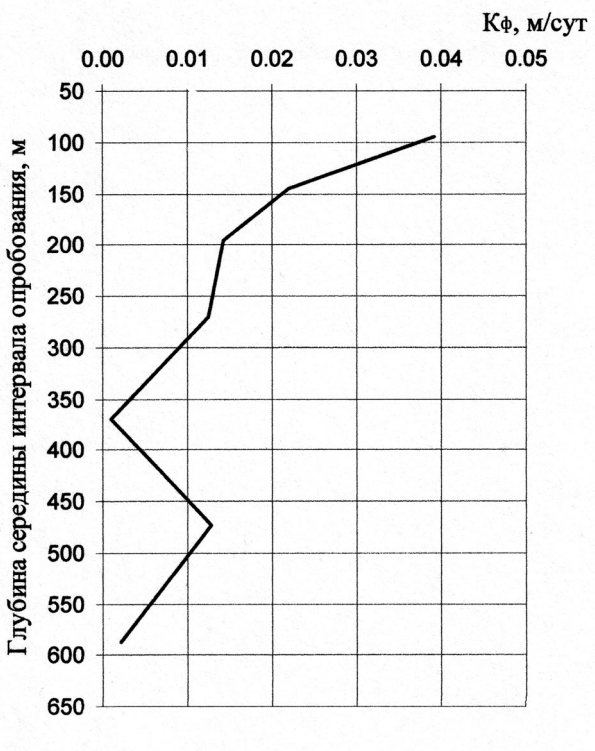

Рис. 1. Закономерное изменение фильтрационных свойств скальных пород с глубиной в массиве Петропавловского рудного поля.

В верхней части разреза до глубины 80–100 м здесь залегают рыхлые осадочные отложения юрского возраста, представленные глинами, песками пылеватыми и заглинизированными галечниками. Ниже 80–100 м залегают скальные породы палеозойского возраста.

Несмотря на существенные различия в петрографическом составе палеозойских скальных пород, полевые и лабораторные инженерно-геологические исследования показали, что вулканогенные, вулканогенно-осадочные и метаморфические породы имеют близкие прочностные и деформационные показатели. В соответствии с ГОСТ 25.100–95 “Грунты. Классификация”, все скальные породы Петропавловского рудного поля были отнесены к категории прочных и очень прочных. Это означает, что по геомеханическим показателям скальный массив Петропавловского рудного поля может рассматриваться как однородный.

Поинтервальное гидрогеологическое опробование глубоких скважин показало закономерное изменение фильтрационных свойств в разрезе (рис. 1). Максимальные фильтрационные свойства наблюдались в кровле скального массива на глубине 100–200 м. Вниз по разрезу фильтрационные свойства постепенно снижались. Несмотря на то, что в разрезе отсутствуют горные породы, обладающие выраженными водоупорными свойствами, при гидрогеологическом опробовании в скальном массиве на глубине 300–350 м был выявлен водоупорный горизонт. Ниже водоупорного горизонта на глубине 350–450 м фильтрационные свойства скальных пород вновь возрастали. Окончательное падение фильтрационных свойств фиксировалось на глубине 530 м. Закономерное чередование проницаемых и водоупорных зон неизменно повторялось в разрезе каждой инженерно–геологической скважины. Глубина залегания водоносных и водоупорных горизонтов оставалась постоянной независимо от особенностей геологического строения разреза.

Изначально предполагалось, что все трещинные воды в пределах скального массива относятся к приповерхностному палеозойскому водоносному комплексу, обладающему единым уровнем подземных вод. Однако изучение положения статических уровней показало, что напоры подземных вод существенно изменяются в зависимости от глубины залегания исследуемого интервала. Изменение напоров подземных вод с глубиной носит закономерный характер (рис. 2). Максимальные напоры наблюдаются в кровле палеозойских пород в интервалах глубин от 100 до 200 м. Вниз по разрезу напоры снижаются, на глубине 240–310 м фиксируется минимальный напор подземных вод во всех четырех глубоких инженерно-геологических скважинах. В интервалах опробования, располагающихся ниже глубины 310 м, напоры подземных вод вновь возрастают. Существенный перепад напоров говорит о значительной неоднородности в гидрогеологическом строении палеозойского водоносного комплекса.

В результате поинтервального опробования было выявлено закономерное изменение химического состава поземных вод с глубиной. Изменение содержания макрокомпонентов четко прослеживается по всем четырем инженерно–геологическим скважинам. На рис. 3 показаны графики закономерного изменения содержания некоторых макрокомпонентов в подземных водах, отобранных из заранее изолированных интервалов. Опробование показало, что в верхней части скального массива до глубины 200 м состав подземных вод, как правило, хлоридный кальциево-магниево-натриевый. Начиная с глубины 200 м состав подземных вод изменяется до хлоридно-сульфатного натриевого. Наиболее яркие особенности в химическом составе подземных вод отмечаются на глубине 240–310 м. Данный интервал глубин ограничен на графиках двумя пунктирными линиями. Здесь наблюдаются максимальные содержания иона натрия и сульфат-иона, а также минимальные содержания хлор-иона, ионов кальция и магния.

Изменение фильтрационных свойств, изменение химического состава, и, что особенно важно, изме-

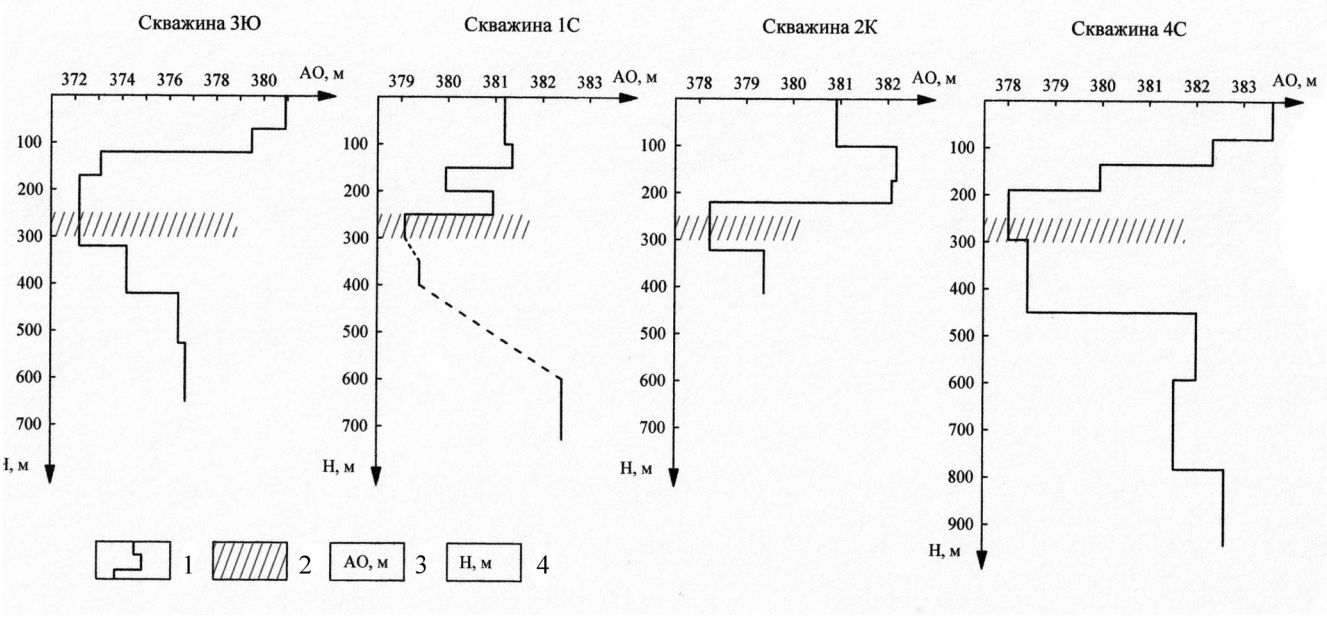

Рис. 2. Закономерное изменение напоров подземных вод с глубиной.

1 – кривая изменения напоров по интервалам опробования; 2 – положение в разрезе основного дренирующего горизонта, 3 – абсолютная отметка уровня подземных вод, 4 – глубина интервала опробования.

нение напоров подземных вод с глубиной по разным интервалам опробования свидетельствует о наличии в разрезе обособленных водоносных горизонтов, разделенных водоупорными горизонтами и слоями. Таким образом, благодаря поинтервальному опробованию было выявлено гидрогеологическое расслоение скального массива, связанное с тектонически напряженным состоянием и закономерностями его изменения по глубине (рис. 4).

Тщательный анализ геологических данных показал, что положение водоносных и относительно водоупорных горизонтов в разрезе не связано с изменением петрографического состава пород. В геологическом разрезе четырех скважин до глубины 500 м наблюдается сложное переслаивание лав, туфов и вулканогенно-осадочных пород базальтового, андезито-базальтового, андезито-дацитового и дацитового состава, присутствуют метасоматиты. Прослои лав залегают под углом 25–40° с падением на северо–восток. Рудные интервалы, обладающие особыми инженерно-геологическими свойствами и минералогическим составом, постепенно погружаются в северном направлении с глубины около 300 м в районе скважины 3Ю до глубины порядка 1000 м в районе скважины 4С. В массиве отсутствуют породы, обладающие выраженными водоупорными свойствами. Все петрографические разности имеют близкие прочностные и деформационные показатели. Поэтому в условиях напряженного состояния под действием современных тектонических сил скальный массив имеет возможность деформироваться, как однородный. Деформация массива выражается в гидрогеологическом расслоении на обособленные водоносные горизонты, разделенные относительно водоупорными горизонтами и слоями.

В отличие от наклонного залегания геологических тел, ограничивающих пространственное распространение той или иной петрографической разновидности скальных пород, водоносные и относительно водоупорные горизонты в массиве Петропавловского рудного поля залегают практически строго горизонтально. Гидрогеологическое расслоение происходит вследствие закономерного изменения напряженного состояния с глубиной, что приводит к неравномерной деформации массива скальных пород и, как следствие, к неодинаковому развитию проницаемых трещин в разрезе. Проницаемое трещинное пространство является сложной динамической системой, остро реагирующей на деформации и связанное с ними изменение трех важнейших параметров: количества открытых трещин, степени их раскрытия и степени взаимосвязи. Вследствие изменения геометрии трещинного пространства происходят существенные вариации фильтрационных свойств.

Гидрогеологические исследования в глубоких скважинах показали, что минимальный напор подземных вод по данным опробования всех четырех инженерно-геологических скважин наблюдается на глубине 240–310 м (рис. 2). То есть, на глубине 240–310 м залегает основной дренирующий горизонт скального массива Петропавловского рудного поля. Несмотря на то, что фильтрационные свойства

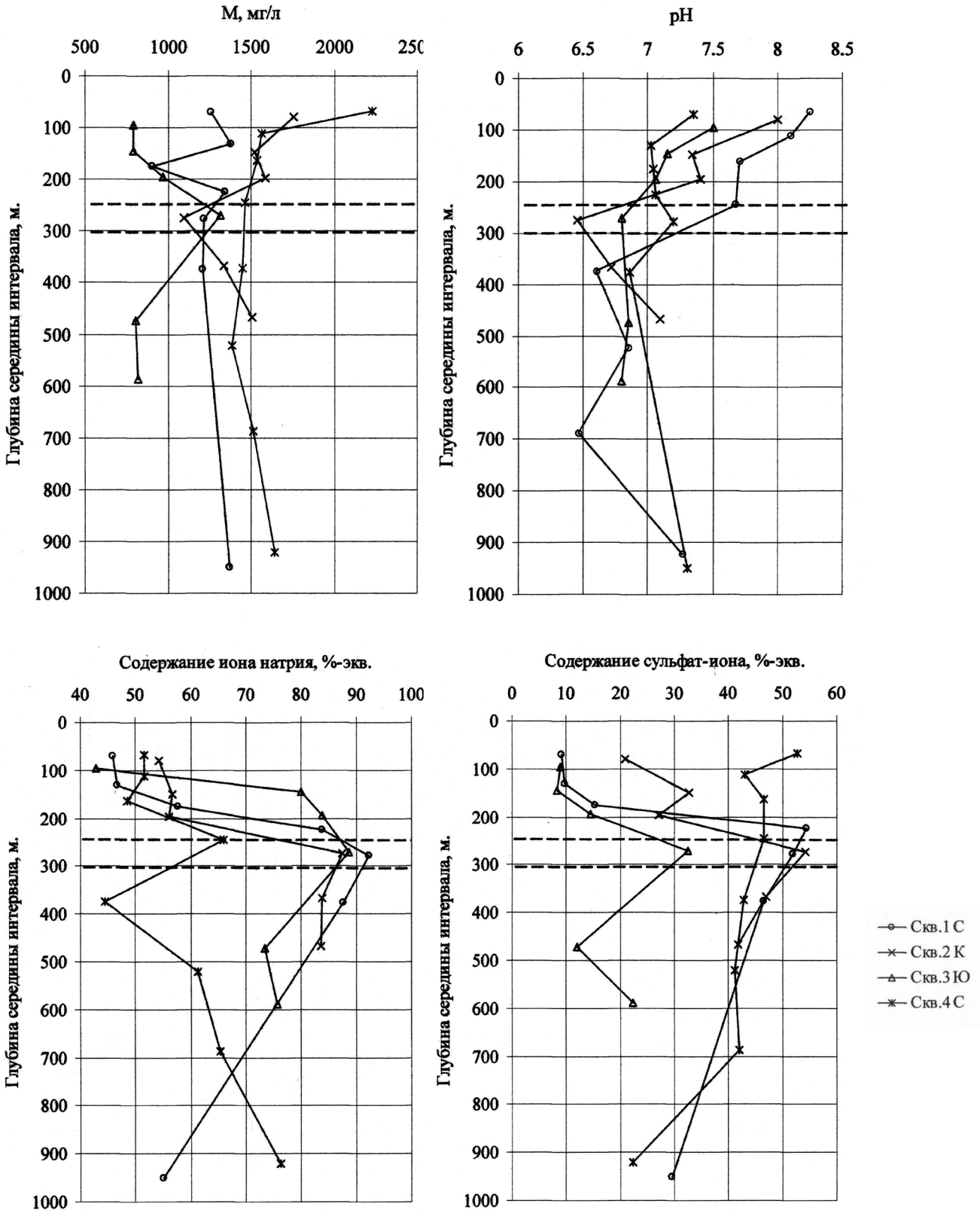

Рис. 3. Изменение минерализации, показателя pH, содержания иона натрия и сульфат-иона подземных вод с глубиной по интервалам опробования.

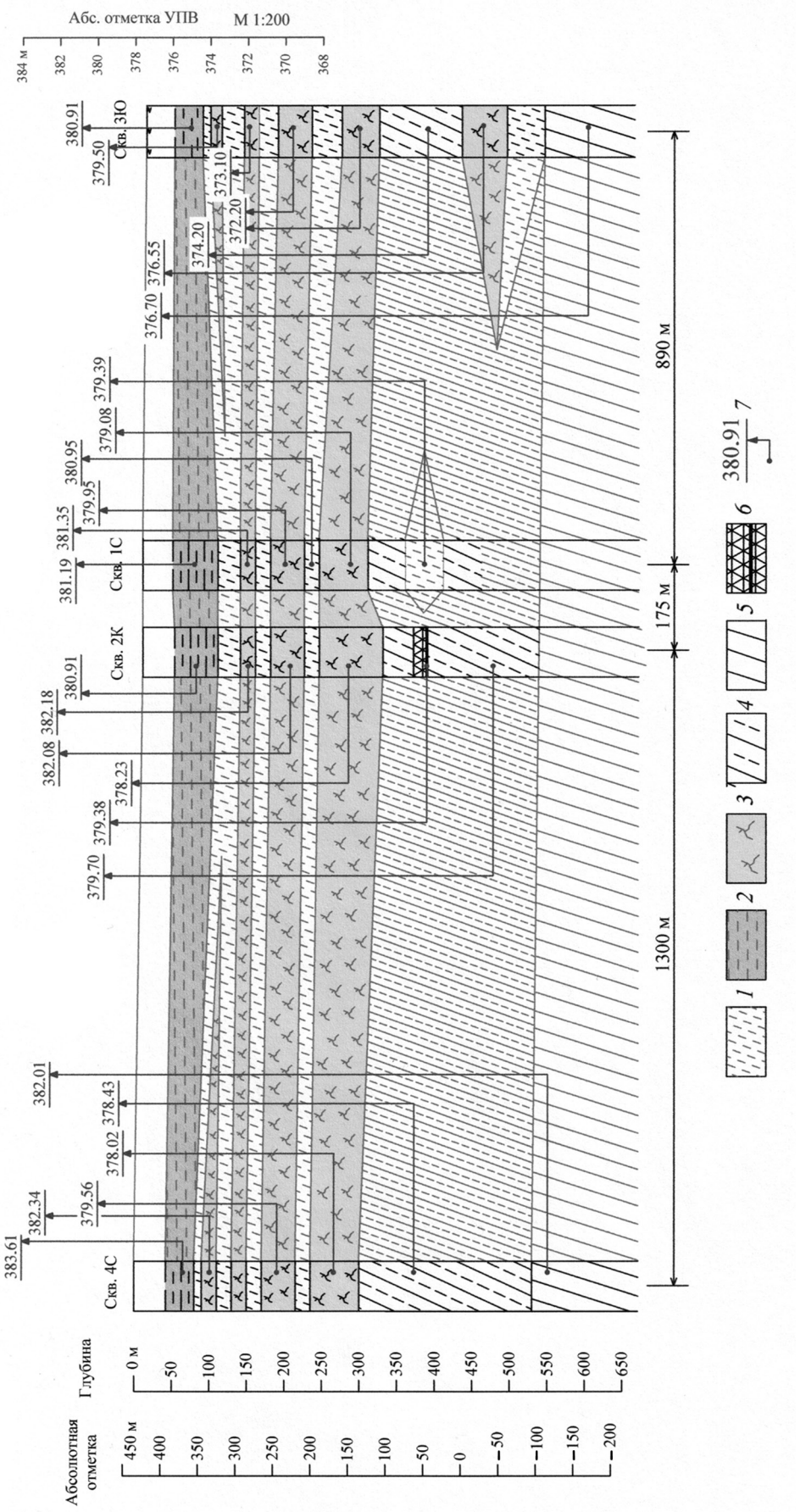

Рис. 4. Гидрогеологическое расслоение скального массива в условиях современного напряженного состояния.

1 – относительно водоупорный горизонт, 2 – юрский водоносный горизонт рыхлых отложений, 3 – водоносный горизонт скального массива, 4 – водоупорный горизонт, 5 – региональный водоупорный горизонт, 6 – водоносная зона тектонического разлома, 7 – абсолютная отметка уровня подземных вод отдельного интервала опробования.

данного горизонта не являются максимальными, на указанной глубине трещины, по всей видимости, обладают наилучшей взаимосвязью. Как известно, в любой проницаемой среде вода движется по линии наименьшего сопротивления. Следовательно, водоносный горизонт, залегающий на глубине 240–310 м, является наиболее предпочтительным для транзита подземных вод с позиций энергетических затрат. Это означает, что в пределах водораздельного участка месторождения Юбилейное в трещиноватом скальном массиве происходит преимущественно вертикальная нисходящая фильтрация подземных вод в основной дренирующий горизонт, располагающийся на глубине 240–310 м. В границах самого горизонта, вероятно, происходит горизонтальное движение подземных вод в направлении местного базиса эрозии. По достижении речных долин горизонтальный характер движения подземных вод вновь сменяется вертикальным и происходит восходящая разгрузка подземных вод в поверхностные водотоки.

Особые гидродинамические условия основного водоносного горизонта приводят к значительным особенностям в химическом составе подземных вод (рис. 3). Необходимо отметить, что минерализация подземных вод, имеющая существенные отличия для разных точек опробования, располагающихся в удаленных друг от друга частях скального массива, в пределах основного дренирующего горизонта на глубине 240–310 м, приходит практически к одним и тем же значениям во всех четырех инженерно-геологических скважинах, что хорошо видно на рис. 3. Это свидетельствует о смешении подземных вод различного состава в пределах основного дренирующего горизонта.

Гидрогеологическая стратификация скального массива Петропавловского рудного поля обусловлена механизмом образования массовой трещиноватости в приповерхностной части земной коры в пределах зоны хрупкой деформации в условиях современного тектонического напряженного состояния. Наличие тектонических разломов, как структур разрушения, может вносить существенные изменения в фильтрационную структуру скальных массивов и несколько искажать общую картину гидрогеологического расслоения. В некоторых случаях, активные тектонические разломы могут выступать в качестве линейных водоносных или водоупорных зон, не связанных с общим закономерным развитием водоносных горизонтов. Так, например, маломощный водоносный тектонический разлом вскрыт скважиной 2К на глубине 380–390 м (рис. 4). Данный разлом представляет собой характерный пример того, как линейная трещиноватая зона тектонического нарушения пересекает относительно водоупорный горизонт, располагающийся в массиве на глубине 300–400 м и, таким образом, вносит искажение в общую картину стратификации скального массива.

В результате гидрогеологических исследований на территории Петропавловского рудного поля, были сделаны следующие выводы:

1. Современное напряженное состояние является основным фактором, влияющим на проницаемость скальных пород и формирующим тектоническое расслоение скального массива Петропавловского рудного поля на ряд выраженных водоносных горизонтов, разделенных относительно водоупорными горизонтами и слоями. Положение водоносных и водоупорных горизонтов не связано с изменением петрографического состава скальных пород.

2. Основной дренирующий водоносный горизонт скального массива располагается на глубине 240–310 м. Положение основного дренирующего горизонта в разрезе фиксируется по минимальным значениям напора подземных вод и по особенностям их химического состава.

3. Массовая трещиноватость в скальном массиве Петропавловского рудного поля развита до глубины 530 м. Ниже глубины 530 м наблюдается падение фильтрационных свойств и фиксируется региональный водоупорный горизонт.

4. Тектонические разломы могут вносить искажения в фильтрационную структуру скальных массивов и фиксироваться в гидродинамическом поле в качестве локальных линейных зон повышенной или пониженной проницаемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лукьянов А.Е.* Гидрогеомеханический анализ ориентировки водоносных тектонических структур в скальных породах Петропавловского рудного поля // Изв. вузов. Геология и разведка. 2008. № 6. С. 84–85.
2. *Лукьянов А.Е.* Гидрогеомеханический анализ ориентировки водоносных тектонических структур в скальных породах // Изв. вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 182–184.
3. *Макаров А.Б.* Практическая геомеханика // Пособие для горных инженеров. М.: Горная книга, 2006. С. 41–61.
4. *Тагильцев С.Н.* Геомеханические основы гидрогеологической стратификации скальных массивов Урала // Изв. вузов. Горный журнал. 1995. № 5. С. 75–79.
5. *Тагильцев С.Н.* Основы гидрогеомеханики скальных массивов. Учебное пособие. Екатеринбург: УГГГА, 2003. 88 с.
6. *Тагильцев С.Н., Лукьянов А.Е.* Гидрогеологическая стратификация скального массива Петропавловского рудного поля // Подземные воды востока России. Мат-лы XIX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Тюмень: Тюменский Дом печати, 2009. С. 57–60.
7. *Тагильцев С.Н., Лукьянов А.Е.* Гидрогеологические признаки тектонической стратификации скального массива // Инженерная геология. 2009. № 1. С. 60–64.
8. *Шерман С.Н., Днепровский Ю.И.* Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 41 с.

Рецензент С.Г. Дубейковский

The hydrogeological stratification of rock massif under modern stress conditions

S. N. Tagiltsev, A. E. Lukjanov

The Ural State Mining University

The rock filtration characteristics is related to permeabilities of open cracks. The permeabilities of cracks is a result of deformation of rock massif under the influence of surplus horizontal tectonic stresses. The significance of rock weight stress is secondary at the upper part of Earth's crust, but it increases with depth and makes variations of stress condition in rock massif. Modern stressed mode of the Earth's crust determine formation of rock filtration characteristics. The selective flow test of deep (650–1350 m) wells has indicated that changes in stress condition results in nonuniform distribution of permeable cracks in section, and consequently, in formation of hydrogeological stratification of rock massif.

Key word: *rock massif, modern tectonic stresses, fractures, stratification.*