

размер элементов неоднородности. Отличным примером тому являются наблюдения, проводимые на шламохранилищах в течение всего срока их эксплуатации. Это прежде всего графики многолетних ежесуточных замеров уровня жидких шламов, а также данные изменений положения депрессионных кривых в теле дамб обвалования на разных участках, полученных в результате ведения режимных наблюдений по сети скважин-пьезометров.

Таким образом, успешное решение задач прогнозирования качества подземных вод на участках шламохранилищ не может быть выполнено без учета гидродинамических условий, сложившихся здесь в результате их длительной эксплуатации. Именно опытно-эксплуатационный метод на подобных объектах является наиболее приемлемым и информативным в сочетании с гидрогеохимическим и гидродинамическим мониторингом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Парфенова Л.П.** Прогноз качества подземных вод в зонах влияния шламохранилищ медеплавильных комбинатов Среднего Урала: Автореф. дис... канд. геол.-мин. наук. - Екатеринбург, 1997. - 22 с.

2. **Тютюнова Ф.И., Пантелеева И.Я., Пантелеева Т.И., Огильви А.Н.** Прогноз качества подземных вод в связи с их охраной от загрязнения. - М.: Наука, 1978. - 204 с.

УДК 624.131 + 556.3

С.Н. Тагильцев

### РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРУКТУРЕ И ГЕНЕЗИСЕ ЗОНЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ

Фильтрационная структура скальных массивов определяется развитием зон трещиноватости и состоит из двух компонентов. Вблизи поверхности земли практически повсеместно фиксируется зона региональной приповерхностной трещиноватости. Кроме того, значительную, но не однозначную роль в формировании фильтрационной структуры скальных массивов играют тектонические нарушения.

Мощность зоны региональной трещиноватости увеличивается в речных долинах и уменьшается на водоразделах. На фоне относительно равномерной региональной приповерхностной трещиноватости выделяются локальные водоносные зоны, как правило, связанные с тектоническими нарушениями. Сочетание региональной зоны приповерхностной трещиноватости и локальных водоносных зон привело к формированию представлений о корово-блоковой структуре скальных массивов [4].

Со времени (1939 г.) опубликования работы Д.К. Щеголева и Н.И. Толстихина [15] в отечественной гидрогеологической литературе утвердилось представление о том, что водоносный горизонт региональной приповерхностной трещиноватости приурочен к зоне выветривания скальных массивов (зоне экзогенной трещиноватости), а распространение гипергенных трещин ограничивается глубиной 60÷120 м.

По мере накопления новых фактических данных глубину развития зоны водоносных трещин различные исследователи стали указывать до 150÷200 м и более. Вместе с тем представления о развитии региональной трещиноватости на глубину не более 100 м до сегодняшнего времени определяют основные методические установки при проведении гидрогеологических работ в скальных массивах. Указанные представления не мешали решению задач водоснабжения, но очень часто не соответствовали данным рудничных гидрогеологов [7,9]. Следует отметить, что противоречивые сведения о глубине развития приповерхностной трещиноватости и разные мнения о генезисе трещин достаточно отчётливо проявились ещё в упомянутой работе Д.К. Щеголева и Н.И. Толстихина и прослеживаются в ряде работ, опубликованных в последующие годы.

Противоречия в представлениях о глубине развития приповерхностной трещиноватости и генезисе трещин наиболее наглядно отразились в ряде обобщающих работ, опубликованных в 80-е и 90-е годы. Рассмотрим наиболее значительные работы.

Б.Е. Антыпко [2], обобщая гидрогеологические данные по горноскладчатым областям, сделала вывод, что фильтрационные свойства древних скальных пород, связанные с их генезисом, были давно утрачены и возникли вновь вблизи поверхности в результате экзогенной дезинтеграции. В указанной работе содержатся данные, что глубина зоны приповерхностной трещиноватости составляет 300-400 м и более. Механизм возникновения трещин за счет воздействия экзогенных факторов на такую значительную глубину детально не раскрывается.

В монографии С.Н. Чернышева [14] обобщены представления о закономерностях строения и развития трещин в горных породах. С.Н. Чернышев отмечает, что трещины в массиве горных пород представляют собой разрывы сплошности, образующиеся при хрупком разрушении. Следовательно, трещины являются результатом силового воздействия на массив горных пород, а их ориентировка отражает пространственное положение осей главных напряжений. Каждая генерация трещин в массиве представляет собой, согласно утвердившимся в тектонофизике воззрениям, запись поля напряжений, существовавших в момент возникновения трещин. Смена полей напряжений приводит к возникновению новых генераций трещин.

Гипергенные трещины, по мнению С.Н. Чернышева, образуются у поверхности земли под влиянием разгрузки напряжений, существовавших в массиве. В ходе разгрузки наследуются трещины, образовавшиеся в ходе предыдущих деформаций. Большую роль, особенно в образовании субгоризонтальных трещин, играет наличие в массиве весьма высоких значений сжимающих горизонтальных напряжений, что в свою очередь может привести к возникновению вертикальных растягивающих напряжений.

Глубина, на которую распространяется разуплотнение массива в результате разгрузки, составляет первые десятки метров. Выветривание сильно изменяет решетку трещин в горной породе. Оно ведет к расширению существующих трещин, к сгущению их в существующих системах и к образованию новых трещин выветривания, часто многочисленных, своеобразной ориентировки. С.Н. Чернышев, ссылаясь на мнение других исследователей, считает, что выветривание, так же, как и разгрузка, развивается по решетке существующих трещин, т.е. избирательно, унаследованно.

Периодически под влиянием изменения внешних условий (это выражается в перестройке тензора напряжений) тенденция унаследованного развития пресекается. Возникают новообразованные системы трещин, которые закономерно расположены по отношению к новым осям главных нормальных напряжений. Это не исключает при смене условий возврата к старому плану деформаций. Иногда при метаморфизме, гидротермальном залечивании трещин или выветривании сеть трещин перестает существовать. Унаследованное развитие трещиноватости прекращается. В массиве возникает наложенная сеть трещин, слабо отражающая предыдущий план деформаций. Старая сеть может прослеживаться в виде жил и даек, которые не являются дефектами массива в механическом смысле и потому не влияют или слабо влияют на развитие наложенной сети.

Несмотря на важные положения и обобщения, которые содержатся в монографии С.Н. Чернышева, вопрос о генезисе и структуре зоны приповерхностной трещиноватости ниже зоны разгрузки им детально не рассматривается.

Представления о закономерностях вертикальной изменчивости параметров трещиноватости и фильтрационных свойств скальных массивов, которые отражают современные данные, изложены в статье Э.И. Ткачука, опубликованной в 1992 г. [13]. Автор обобщил и проанализировал многочисленные работы, содержащие фактический материал. Исследования выполнялись с соблюдением основных предпосылок корреляционного анализа экспериментальных данных. Основным результатом исследований является вывод о том, что ведущим фактором формирования проницаемости является напряженное состояние скальных массивов. Влияние экзогенных факторов ослабевает на глубинах 5-40 м (преимущественно 10-25 м). Автор считает, что следует разделять нормальное (геостатическое) напряженное состояние и геодинамическое напряженное состояние. Геостатическое напряженное состояние характеризуется тем, что горизонтальные напряжения имеют значения меньше, чем вес столба горных пород. При геодинамическом типе напряжений горизонтальные напряжения значительно, в несколько раз, превышают литостатическое давление.

Кроме представленного выше вывода, в статье содержатся разнообразные замечания и выводы. Не вызывают возражений заключение, что в целом показатели фильтрационных свойств уменьшаются с глубиной по определённом закону, и вывод, что очень часто требуется расчленение (стратификация) скального массива.

Вывод о стационарной (практически постоянной) интенсивности трещиноватости по глубине противоречит результатам многочисленных исследований, в том числе и данным, представленным автором. Обусловленность изменения фильтрационных свойств, главным образом за счет уменьшения раскрытия трещин, представляется слабо обоснованной.

Следует отметить, что в рассматриваемой статье убедительно показано, что зона приповерхностной трещиноватости имеет глубину развития до 300+400 м, а иногда и более. Отмечено, что в ряде случаев (палеозойские и более древние породы) литологический состав слабо влияет на закономерности развития трещиноватости и фильтрационных свойств. Кроме того, указывается, что геометрия систем трещин и их ориентировка слабо влияют на трещинную проницаемость горных пород.

В целом необходимо отметить важность и значение сделанных автором выводов и обобщений. Следует указать, что Э.И. Ткачук, признавая ведущую роль напряженного состояния в формировании трещиноватости и проницаемости скальных массивов, все-таки использовал термины нормальное (геостатическое) и аномальное (геодинамическое) поля напряжений.

В последние годы увеличивается число специалистов, которые считают, что напряженное состояние верхней части земной коры в большинстве горноскладчатых регионов характеризуется превышением горизонтальных напряжений над литостатическим давлением. Такое напряженное состояние называют геодинамическим, тектоническим или просто напряженно-деформированным.

В ряде публикаций отмечается, что идеи о напряженно-деформированном состоянии верхней части земной коры стали активно восприниматься гидрогеологами под влиянием разработанных Г.С. Вартаняном и Г.В. Куликовым представлений о гидрогеодеформационном поле Земли (1984 г.). Эти представления показали взаимообусловленность напряженно-деформированного состояния породных массивов и их водопроницаемости.

На основе этих представлений появились попытки разработать в первом приближении модель напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры и движения в ней подземных вод с учетом опыта бурения сверхглубоких скважин и строительства крупномасштабных подземных сооружений. В статье В.В. Каякина, А.В. Мулиной, В.Л. Миловидова [3] предлагается рассматривать сложное напряженное состояние верхней части земной коры, используя соотношение величин вертикальных ( $\sigma_v$ ) и горизонтальных напряжений ( $\sigma_r$ ).

Авторы статьи считают, что по данным, полученным при строительстве подземных сооружений, можно выделить в верхней части земной коры зоны повышенных и пониженных горизонтальных напряжений. О том же свидетельствуют данные бурения сверхглубоких скважин, в которых зоны различных напряжений выделяются по геофизическим, фильтрационным и лабораторным исследованиям образцов пород. В зависимости от напряженного состояния скальных пород и характера циркуляции подземных вод в верхней части земной коры, авторы статьи выделяют несколько гидрогеодеформационных зон. Верхняя зона выветривания и интенсивного разуплотнения пород со спорадическим обводнением имеет небольшую мощность, залегая в интервале глубин 0-0,1 км. Горизонтальные напряжения, с учетом коэффициента Пуассона, составляют около 50 % от вертикальных. Следующая зона, которая, по мнению авторов, характеризуется разгрузкой напряжений и интенсивным водообменом, располагается в интервале глубин 0,1-1 км. Величины горизонтальных напряжений характеризуются весьма широким разбросом,  $\sigma_r = (0,5 - 2) \cdot \sigma_v$ .

Кроме приповерхностных зон, авторы статьи рассматривают и глубинные гидрогеодеформационные зоны. Несмотря на гипотетический характер изложенной модели, в данной статье отражаются представления о тесной взаимосвязи напряженно-деформированного состояния и фильтрационной структуры земной коры.

В 70-90-е годы на ряде объектов Урала выполнены детальные исследования структуры зоны приповерхностной трещиноватости [1,7,9], а на основании обобщения этих и других данных сделаны обобщения, позволяющие уточнить генезис и структуру региональной зоны трещиноватости [10-12].

Соображения, позволяющие подвергнуть сомнению ведущую роль выветривания в формировании приповерхностной зоны трещиноватости, сводятся к следующему. Основным

фактором физического выветривания являются сезонные колебания температуры. Глубина сезонных колебаний температуры не превышает первых десятков метров. Сомнительно, чтобы слабые колебания температуры на глубине более 10 м могли существенно изменить горные породы и привести к образованию новых трещин. Мощность зоны замерзания и оттаивания, в пределах которой наблюдается значительное разрушение горных пород, не превышает нескольких метров от поверхности. Химическое выветривание горных пород происходит, главным образом, под влиянием компонентов, растворенных в подземных водах. В свою очередь, подземные воды могут циркулировать только в открытых трещинах. Следовательно, химическое выветривание должно развиваться по трещинам, образовавшимся вследствие каких-то других причин.

Таким образом, следует считать, что глубина воздействия современных факторов выветривания на горные породы невелика и соответствует примерно мощности современных элювиальных образований. Мощность элювия в Уральском регионе изменяется в зависимости от рельефа и вещественного состава пород и обычно не превышает 10 – 20 м. Можно предполагать, что развитие зоны региональной трещиноватости не имеет тесной связи с процессами выветривания.

Разнообразные фактические материалы показывают, что мощность водоносного горизонта на Урале определяется, главным образом, глубиной относительно современной земной поверхности. Необходимо учитывать, что денудация непрерывна, а строение и мощность водоносного горизонта достаточно стабильны в различных районах Урала. Следовательно, главную роль в формировании водоносного горизонта играют современные геологические процессы. Они изменяют инженерно-геологические и, в конечном счете, фильтрационные свойства пород за относительно короткие промежутки времени.

Так как большинство горноскладчатых областей находится в условиях геодинамического напряженного состояния, следует выявить закономерности формирования зоны приповерхностной трещиноватости, опираясь на особенности поведения массива горных пород в поле естественных напряжений. При анализе многочисленных работ, посвященных проблеме напряженного состояния земной коры, следует опираться на те из них, которые содержат наиболее интересные концепции и обобщают разнообразные научные сведения и подходы.

Интересные обобщения содержатся в работах И.М. Петухова, которые наиболее полно представлены в монографии “Геодинамика недр” [8], подготовленной совместно с И.М. Батугиной. В рассматриваемой работе делается попытка рассмотреть вопрос о напряженном состоянии земной коры на основе концепции о том, что земная кора в целом как система и ее отдельные участки находятся в специальном предельно напряженном состоянии. И.М. Петухов считает, что предельно напряженное состояние – это форма и условие существования геомеханической, а вернее, геодинамической системы “массив горных пород”. Горизонтальное сжатие земной коры создает условия для деформирования ее части, прилегающей к земной поверхности, и установления в этой зоне предельно напряженного состояния в массивах горных пород.

Представления о реологической расслоенности земной коры рассмотрены в работах В.Н. Николаевского [5,6]. В.Н. Николаевский выделяет три основных этапа развития деформаций в геоматериалах (хрупкий, переходный и пластичный), которые связаны с реологическими изменениями состояния горных пород в условиях повышения давления. Хрупкий этап деформации развивается в условиях одноосного сжатия или при относительно небольших значениях, по сравнению с главным напряжением бокового сжатия.

В условиях допредельного напряженного состояния трещины являются несквозными, и поэтому материал не теряет своей сплошности. Одновременно следует отметить, что допредельные трещины являются массовыми, т.е. развиваются относительно равномерно во всем объеме материала и образуют взаимосвязанную сеть трещин. Массовые трещины представляют собой трещины предразрушения. При достижении предельного состояния, в зоне плоскости с максимальными напряжениями, происходит объединение трещин в единый разлом, материал теряет свою сплошность, и в ходе возникающих смещений напряжение падает ниже предельного.

По мере увеличения бокового давления, по сравнению с максимальным главным напряжением, количество массовых трещин уменьшается. При определенном соотношении максимальных и минимальных напряжений достигается такое состояние, когда массовые трещины предразрушения практически не образуются. Трещины предразрушения локализируются в зоне будущего разлома и при достижении предельного состояния объединяются в единый разлом.

Состояние материала в определенном диапазоне давлений (соотношении максимальных и минимальных напряжений), когда разрушение материала происходит по единому разлому, без развития массовых трещин предразрушения, В.Н. Николаевский характеризует как промежуточное или переходное состояние. Переходное состояние понимается В.Н. Николаевским как промежуточное между хрупким и пластичным состоянием горных пород.

Напряженное состояние массива горных пород во многих горноскладчатых регионах характеризуется тем, что максимальное сжимающее напряжение ориентировано горизонтально и по значению в несколько раз превышает литостатическое давление. Рассматривая верхнюю часть земной коры с геомеханических позиций, следует считать, что вес столба горных пород в приповерхностной части земной коры играет роль минимального главного напряжения. Вблизи поверхности земли, где литостатическое давление практически отсутствует, реализуются условия, близкие к условиям одноосного сжатия. По мере нарастания глубины значение литостатического давления нарастает и соотношение между максимальным (горизонтальным) и минимальным (вертикальным) напряжениями изменяется. Следует полагать, что в условиях предельно напряженного состояния, в приповерхностной зоне земной коры, происходит хрупкая деформация горных пород с образованием сети массовых трещин предразрушения. Именно эти трещины играют основную роль в формировании региональной зоны приповерхностной трещиноватости и, соответственно, приповерхностного водоносного горизонта в скальных массивах. На определенной глубине происходит смена хрупкого состояния массива горных пород на промежуточное. Ниже этой глубины массовая трещиноватость отсутствует и происходит образование только локальных зон тектонических нарушений. Данная глубина отражает положение регионального водоупора.

Геомеханическое состояние приповерхностной зоны хрупкой деформации описывается аналитическими зависимостями, опирающимися на линейный критерий предельного состояния (закон Кулона – Мора). На основании представлений о пределах применимости закона Кулона – Мора [12] выведены зависимости, позволяющие рассчитывать положение нижней границы зоны хрупкой деформации (глубину до регионального водоупора). Сравнительный анализ результатов теоретических расчетов и фактических данных по ряду месторождений полезных ископаемых Урала показал их хорошее соответствие. Фильтрационные свойства скальных горных пород определяются степенью раскрытия и количеством открытых трещин. Если открытые трещины возникают в результате напряженно-деформированного состояния породного массива, то фильтрационная структура в верхней части геологического разреза определяется теми же факторами. Таким образом, фильтрационные свойства и гидрогеологическая стратификация скального массива формируются под воздействием напряженного состояния этого массива.

Наряду с общим соответствием зоны приповерхностной трещиноватости (зоны хрупкой деформации) и приповерхностных водоносных образований детальный анализ фактических материалов позволил выявить ряд особенностей и интересных закономерностей как в строении трещиноватости, так и гидрогеологических структур. В целом выявилось сложное строение приповерхностной зоны трещиноватости, которое в свою очередь определяет формирование системы водоносных и относительно водоупорных горизонтов, имеющих региональное распространение. Таким образом, в горноскладчатых областях, находящихся в предельно напряженном состоянии, вблизи поверхности земли формируется зона хрупкой деформации скальных горных пород. Развитие допредельных массовых трещин, возникающих в зоне хрупкой деформации, определяет формирование системы водоносных и относительно водоупорных горизонтов, имеющих региональное распространение. Структура зоны хрупкой деформации и приповерхностного водоносного комплекса зависит, главным образом, от геомеханических параметров массивов горных пород. Взаимосвязь геомеханических и фильтрационных параметров породных массивов позволяет применять расчетные методы для их взаимного определения.

Таким образом, обзор развития представлений о генезисе и структуре водоносной зоны региональной приповерхностной трещиноватости позволяет сделать следующие выводы:

1. Глубина развития зоны приповерхностной трещиноватости достигает 300÷400 м, а иногда и более. Глубина воздействия гипергенных процессов на процессы развития трещин обычно не превышает 50 м. Водоносная зона региональной трещиноватости имеет сложное строение, что заставляет ставить задачу изучения ее стратификации.

2. Основную роль в возникновении и развитии зоны приповерхностной трещиноватости играет геодинамическое (тектоническое) напряженно-деформированное состояние земной коры. Трещины возникают в результате хрупкой деформации горных пород под воздействием значительных напряжений.

3. В регионах, сложенных древними породами, литологический состав относительно слабо влияет на закономерности развития трещиноватости и значения фильтрационных показателей. Структура зоны хрупкой деформации и приповерхностного водоносного комплекса зависит, главным образом, от геомеханических параметров массивов горных пород.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Абатурова И.В., Афанасиади Э.И.** Инженерно-геологическая характеристика карбонатной толщи Воронцовского месторождения // Известия УГГГА. Сер.: Геология и геофизика. - 1998. - Вып.8. - С. 187-192.
2. **Антышко Б.Е.** Гидрогеологические емкости горноскладчатых областей. - М.: Недра, 1986. - 185 с.
3. **Каякин В.В., Мулина А.В., Миловидов В.Л.** Модель строения верхней части земной коры для выбора мест захоронения высокоактивных отходов // XI Российская конференция по механике горных пород. - СПб, 1997. - С. 213 - 220.
4. **Кирюхин В.А., Толстихин Н.И.** Региональная гидрогеология. - М.: Недра, 1987. - 382 с.
5. **Николаевский В.Н.** Механика пористых и трещиноватых сред. - М.: Недра, 1984. - 232 с.
6. **Николаевский В.Н., Шаров В.И.** Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Физика Земли. - 1985. - №1. - С. 16 - 27.
7. **Ново-Шемурское медноколчеданное месторождение:** Отчет о результатах геолого-разведочных работ с 1975 по 1986 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.09.86 / Мингео СССР, Уральское ПГО, Северная геологоразведочная экспедиция. - Ивдель, 1986. - 320 с.
8. **Петухов И.М., Батугина И.М.** Геодинамика недр. - М.: Недра, 1996. - 217 с.
9. **Плотников И.И.** Прогноз обводненности глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых в карстовых массивах // Известия вузов. Горный журнал. - 1993. - №3. - С. 63 - 83.
10. **Тагильцев С.Н.** Особенности эколого-гидрогеологических исследований в скальных массивах // Экологические проблемы гидрогеологии: Восьмые Толстихинские чтения. Мат-лы научно-метод. конф. - СПб.: СПбГИ, 1999. - С. 199 - 201.
11. **Тагильцев С.Н.** Геомеханические основы фильтрационной стратификации скальных массивов // Проблемы региональной гидрогеологии: Седьмые Толстихинские чтения. Мат-лы научно-метод. конф. - СПб.: СПбГИ, 1998. - С. 158-162.
12. **Тагильцев С.Н.** Пределы линеаризации закона Кулона - Мора при расчетах НДС массивов горных пород // Мат-лы X межотрасл. координац. сов. по проблемам геодинамич. безопасности. - Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1997. - С. 213 - 217.
13. **Ткачук Э.И.** Закономерности вертикальной изменчивости параметров трещиноватости и фильтрационных свойств скальных массивов // Инженерная геология - 1992. - № 4. - С. 3 - 26.
14. **Чернышев С.Н.** Трещины горных пород. - М.: Наука, 1983. - 240 с.
15. **Щеголев Д.К., Толстихин Н.И.** Подземные воды в трещиноватых породах. - Л.-М.: Гостоптехиздат, 1939. - 75 с.