УДК 551.49.018

Ю.А.НОРВАТОВ, *д-р геол.-минерал. наук*, *главный науч. сотр.*, *профессор*, *norvatov@mail.ru*
И.Б.ПЕТРОВА, *канд. геол.-минерал. наук*, *ведущий науч. сотр.*, *доцент*, *petrovar@mail.ru*
Н.С.ПЕТРОВ, *канд. геол.-минерал. наук*, *доцент*, *petnik49@mail.ru*
И.В.ТУГАРОВ, *канд. геол.-минерал. наук*, *старший науч. сотр.*, *tugarov@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

Yu.A.NORVATOV, *Dr. g.-m. Sci.*, *Chief Research Fellow*, *Professor*, *norvatov@mail.ru*
I.B.PETROVA, *PhDr. g.-m. Sci.*, *Leading Research Fellow*, *Assistant Professor*, *petrovar@mail.ru*
N.S.PETROV, *PhDr. g.-m. Sci.*, *Assistant Professor*, *petnik49@mail.ru*
I.V.TUGAROV, *PhDr. g.-m. Sci.*, *Senior Research Fellow*, *tugarov@mail.ru*
Saint-Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПРИМЕРЕ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ГРЕМЯХА

Рассмотрен современный уровень проведения гидрогеологических исследований при разведке месторождений. При опытных откачках предложено использовать датчики и численное моделирование, для интерпретации данных – компьютерные технологии. Методика проиллюстрирована конкретным примером разведки месторождения Юго-Восточная Гремяха.

***Ключевые слова*:** гидрогеологические исследования, численное моделирование, месторождение Юго-Восточная Гремяха.

MODERN METHODS OF HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS IN TERMS OF PROSPECTING OF TITANIUM-MAGNETIC IRON DEPOSIT «SOUTH-EAST GREMIAKHA»

The paper considers the contemporary level of hydrogeological investigations during prospecting of deposits. It is suggested to use numerical modeling, sensors, computer programs for pumping tests. These methods are illustrated by prospecting of the South-East Gremiakha deposit.

***Key words*:** hydrogeological investigations, numerical modeling, deposit «South-East Gremiakha».

Несмотря на то, что цели и задачи гидрогеологических исследований при разведке месторождений твердых полезных ископаемых в последние десятилетия не претерпели существенных изменений, кардинально изменились методы и средства их решения [4]. К настоящему времени основные требования к гидрогеологическим работам на месторождениях полезных ископаемых сводятся к получению максимальной информации о гидрогеологических условиях объекта при минимальных финансовых затратах на проведение исследований. Реализация таких требований к гидрогеологическим работам возможна лишь при широком использовании современных компьютерных технологий при планировании, постановке и интерпретации опытно-фильтрационных опробований – основного вида работ, проводимых на стадии разведки твердых полезных ископаемых. Попытка реализации подобного подхода была предпринята при проведении

гидрогеологических исследований на месторождении титаномагнетитовых руд Юго-Восточная Гремяха (Кольский полуостров).

Территория месторождения Юго-Восточная Гремяха относится к Балтийской гидрогеологической области. Результаты гидрогеологических работ, проведенных при разведке месторождения, в целом подтверждают закономерности, отмечаемые при характеристике подземных вод этого региона.

Поисковые геолого-разведочные работы на месторождении были проведены в 1995-1996 годах. В результате были выявлены шесть рудных тел при среднем содержании двуокиси титана 13,4 %.

Площадь месторождения представлена магматическими и метаморфическими породами (габбро, гнейсы, амфиболиты), для которых характерна неравномерная трещиноватость, обусловленная тектоническими напряжениями и процессами физического выветривания. Эти породы практически выходят на поверхность, образуя гидрогеологический массив, к которому приурочены подземные воды трещинно-жильного типа. Гидрогеологическая структура участка месторождения представлена водоносным комплексом, приуроченным к приповерхностной части массива кристаллических пород, характеризующегося постепенным снижением трещиноватости по глубине. Режим приповерхностного водоносного комплекса определяется инфильтрационным характером питания подземных вод при разгрузке их в речную сеть. Общий химический состав подземных вод месторождения аналогичен составу подземных вод зоны свободного водообмена Балтийской гидрогеологической области: воды – пресные слабощелочные мягкие, по составу – преимущественно гидрокарбонатные натриевые с минерализацией до 0,1 г/л.

Планируемая разработка месторождения открытым способом (карьером) потребовала проведения комплекса дополнительных геолого-разведочных работ, в частности гидрогеологических исследований с целью последующего прогноза водопритоков в карьеры при расширении их площади и углублении до проектных отметок. Оценка водопритоков в карьер позволяет классифицировать месторождение по степени сложности гидрогеологических условий и разработать рекомендации по проведению необходимых дренажных мероприятий для обеспечения нормальных условий ведения горных работ.

Комплекс гидрогеологических исследований на месторождении включал проведение полевых работ, основными из которых являлись опытно-фильтрационные опробования скважин путем проведения опытных откачек и наливов. Сложность геологического строения месторождения обусловила внедрение новых подходов к организации гидрогеологических разведочных работ, обеспечивающих получение максимальной информации с минимальными затратами. Для выполнения этого требования было предложено:

- привлечение имитационного моделирования для планирования опытных откачек с целью оптимизации расположения скважин в опытном кусте и выбора режима опробования;
- использование современных технических средств для повышения информативности откачек;
- использование современных компьютерных средств для интерпретации опытно-фильтрационных опробований и прогноза водопритоков в карьер.

Для планирования опытных откачек на стадии разведки месторождений предварительно проводится численное моделирование экспериментов в имитационной постановке [2]. Численная геофильтрационная модель должна отражать особенности гидрогеологического строения опробуемой толщи, фильтрационные характеристики водоносных пластов и относительных водоупоров (по результатам предшествующих стадий разведки месторождения или литературным данным). На созданной численной модели гидрогеологической структуры имитируется опытная откачка с заданным расходом, а в отдельных элементах модели (соответствующих положению наблюдательных скважин) фиксируется изменение напоров моделируемого водоносного комплекса.

По результатам имитационного моделирования планируется конструкция центральной скважины опытного куста, выбирается дебит скважины и расстояния от наблюдательных скважин до центральной, оценивается продолжительность откачки.

В зависимости от особенностей гидрогеологической структуры участка месторождения для имитационного моделирования возможно использование численных моделей осесимметричных потоков к центральной (откачной) скважине. Эти модели уместны при опробовании слоистых пластов с однородными в фильтрационном отношении свойствами в плане. Задача решается в нестационарной постановке для условий неограниченного в плане пласта при применении специализированных программ, учитывающих возможную двумерность осесимметричного потока в разрезе: программа Коха (США), WELL (Муха, Словакия), SATIR (Ломакин, Россия), RELIS (Коносавский, Россия) и др.

Трехмерные модели рационально использовать для анализа подземных потоков в пластах с резко выраженной фильтрационной неоднородностью в плане и разрезе. Для реализации численных моделей такого типа возможно использование программ MODFLOW (США), MODTECH и FLOW (Россия).

Повышение информативности опытно-фильтрационных опробований может быть достигнуто путем применения современных технических средств – датчиков гидростатического давления при проведении опытных откачек и наливов воды в скважины. Особенно эффективны подобные датчики при реализации принципа обратной связи проводимых разведочных работ с гидрогеологическими условиями эксплуатации проектируемых предприятий [1, 3]. К настоящему времени детально разработана методика установки в скважины датчиков гидростатического давления, регламент наблюдений при проведении экспериментов и методика интерпретации результатов на базе компьютерных технологий [5].

Возможности численного моделирования целесообразно использовать и при интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ для анализа индикаторных графиков опытных откачек и наливов (программы MODFLOW, RELIS и др.). Для этих целей можно создавать численные модели двух типов: модели осесимметричных потоков к скважине и модели двухмерных в плане или трехмерных потоков.

Упомянутые выше методические подходы были полностью реализованы при планировании, опробовании и интерпретации опытно-фильтрационных работ, проведенных на месторождении Юго-Восточная Гремяха.

Рассматриваемое месторождение, приуроченное к массиву кристаллических пород, характеризуется весьма важной особенностью: разведочные скважины малого диаметра не тампонируются (при намеченном открытом способе разработки месторождения) и сохраняются длительное время, оставаясь пригодными для использования в качестве пьезометров при проведении опытных откачек. В связи с этим одной из задач, решаемых при планировании опытно-фильтрационных работ, являлась имитация на численных геофильтрационных моделях условий проведения опытных откачек с использованием конкретных групп ранее разбуренных скважин, что позволило существенно сократить затраты на гидрогеологические работы. На численных моделях оценивалась возможность достижения привлекаемых для последующей интерпретации понижений уровней подземных вод по конкретным наблюдательным скважинам, необходимый дебит откачки, регламент наблюдений при проведении откачки и восстановлении уровней. Исходные данные для имитационного моделирования определялись по результатам пробных откачек на поисковой стадии разведки, а также на основе принципов гидрогеологической аналогии с учетом возможных вариаций проницаемости и емкостных характеристик трещиноватых пород. Необходимо отметить, что в рассматриваемых условиях было целесообразно проводить поинтервальное опробование породного массива, которое также имитировалось на численных моделях. Ин-

тервальное опробование природного массива было реализовано при последовательном увеличении глубины центральной (откачной) скважины.

С целью повышения информативности опробования применяли датчики гидростатического давления, размещенные ниже воздухоподающих труб эрлифтовых установок.

Водоносный комплекс вулканогенных и метаморфизованных пород опробован одной одиночной и пятью кустовыми откачками (табл.1).

Таблица 1

Общая характеристика опытно-фильтрационных работ

Номер скважины	Характеристика пород	Вид откачки	Интервал опробования, м
20/16г	Габбро с прослоями амфиболита	Кустовая	0-51,3 0-158 0-319
19/70г	Гранитогнейсы, мигматиты плагиогранитов	»	0-116 0-303
17/39г	Рудное тело с прослоями габбро	»	0-190 0-350
12/10г	Габбро амфиболитизированное	»	0-150 0-320
33/169	Габбро с отдельными включениями титаномагнетитового оруденения	»	0-150
29/120г	Габбро	Одиночная	0-151 0-320

Выполненные опытно-фильтрационные работы позволили определить фильтрационные параметры приповерхностного водоносного комплекса, представленного на разных участках магматическими и метаморфическими породами. По результатам кустовых откачек установлены следующие значения проводимости:

- пород, вмещающих рудные тела и представленных габбро, – от 0,13 м^2/сут (скв.29/120г) до 1,5 м^2/сут (скв.20/16г); в зоне тектонических нарушений проводимость пород, представленных габбро, увеличивается до 5 м^2/сут (скв.12/10г);
- пород, представленных гнейсо-гранитами, – от 12 м^2/сут (скв.19/70г) до 5 м^2/сут (скв.33/169);
- участка водоносного комплекса, приуроченного к рудному телу, – 0,09 м^2/сут (скв.17/39г).

Таким образом, проводимость пород, залегающих в лежачем боку месторождения и представленных в основном гнейсами, заметно превышает проводимость габбро, приуроченных к висячему боку месторождения.

Удельные дебиты скважин в ходе опробования водоносного комплекса изменялись от 0,00013 до 0,13 л/с. Поинтервальное опробование толщи в ходе проведения опытных откачек позволило установить, что удельный дебит, полученный при опробовании первого интервала (от 0 до 150 м), в дальнейшем мало изменялся с увеличением длины опробуемого интервала. Исключение составляет скважина 19/70г, откачками из которой были опробованы гранитогнейсы (табл.2).

Интерпретация результатов опытных откачек проведена как аналитическими методами, так и с использованием численного моделирования. При обработке данных опытно-фильтрационного опробования аналитическими методами была использована программа AQUITEST (автор Л.Н.Синдаловский). Программа Л.Н.Синдаловского предназначена для интерпретации данных одиночных, кустовых и групповых откачек применительно к широкому спектру типовых расчетных схем, в том числе для схемы гетерогенного пласта. Анализ структуры породного массива позволяет предположить наличие двух систем трещин – как более крупного порядка, так и мелких. Поэтому данные проведенных опытных откачек были обработаны по двум типовым расчетным схемам: схеме Тейса – напорный, неограниченный в плане пласт и схеме гетерогенного пласта. Анализ результатов интерпретации опытных откачек (табл.3) позволяет считать опробованную толщу квазиоднородной, т.е. достаточно равномерно нарушенной трещинами одинаковой степени раскрытия.

Полученные результаты поинтервальных опробований породной толщи наглядно свидетельствуют о ярко выраженной тенденции к снижению проницаемости с глубиной, за исключением водоносного комплекса, приуроченного к гранитогнейсам.

Таблица 2

Результаты поинтервального опробования породного массива

Номер скважины	Интервал опробования, м	Дебит, л/с	Понижение уровня в центральной скважине, м	Удельный дебит, л/(с·м)
20/16г	0-51,3	0,003	23,21	0,00013
	0-158	0,26-0,5	20,1	0,013
	0-319	0,31-0,83	19,1	0,016
17/39г	0-190	0,011	23,25	0,0005
	0-350	0,014	30,7	0,0005
19/70г	0-116	0,95	11,87	0,08
	0-303	1,1	8,47	0,13
12/10г	0-150	0,6	30,03	0,02
	0-320	0,6	30,3	0,02
33/169	0-150	1,075	19,14	0,056
29/120г	0-151	0,08	38,96	0,002
	0-320	0,09	42,51	0,002

Таблица 3

Результаты интерпретации опытных откачек с привлечением программы AQUITEST

Номер скважины	Схема Тейса		Схема гетерогенного пласта	
	Проводимость, $м^2$/сут	Пьезопроводность, 10^4 $м^2$/сут	Проводимость, $м^2$/сут	Пьезопроводность, 10^4 $м^2$/сут
20/17	1	1,9	0,9-1	1,2
20/29	1	9	0,7-1,2	3
19/25	3,4	5	1,3-2,3	2,5-4

Таким образом, коэффициент фильтрации толщи до глубины 100 м может быть принят равным порядка 0,01 м/сут, ниже 100 м – порядка 0,001 м/сут.

Гидрогеологические характеристики зоны тектонической нарушенности оценены при проведении откачки из скважины 20/16г. Эта зона была непосредственно зафиксирована при бурении центральной и наблюдательных разведочных скважин опытного куста. Интерпретация данных откачки проведена с применением программы MODFLOW. По результатам численного эксперимента коэффициент фильтрации тектонически нарушенных пород в аномальной зоне составляет порядка 1 м/сут.

В целом, комплекс проведенных опытно-фильтрационных работ свидетельствует о том, что поступающий в горные выработки водоприток будет сконцентрирован в местах вскрытия бортами карьеров тектонических нарушений и оперяющих их трещин.

Прогноз водопритоков в карьеры выполнен на численной геофильтрационной модели с использованием программы MODFLOW. По результатам численного моделирования получены следующие прогнозные оценки притоков подземных вод в горные выработки:

- при разработке карьеров I и II до отметки +(150-180) м притоки, формирующиеся за счет инфильтрационного питания подземных вод, составят 20-25 $м^3$/ч;
- при отработке карьера II до отметки +100 м водоприток может достигать 100 $м^3$/ч за счет привлечения вод реки при наличии зоны повышенной проводимости водоносного комплекса, вскрываемой на восточном борту карьера;
- при увеличении глубины карьера II до нулевой отметки водопритоки в карьеры практически не изменятся.

Гидрогеологические условия ведения горных работ открытым способом можно классифицировать как простые. Для обеспечения нормальных условий эксплуатации карьера достаточна организация открытого водоотлива из карьера. При ведении горных работ на глубинах, превышающих 100 м, для повышения устойчивости бортов карьера возможно применение самоизливающих скважин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Норватов Ю.А.* Оптимизация гидрогеологических исследований при разведке и эксплуатации угольных месторождений на базе компьютерных технологий / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова, О.И.Норватова // Ресурсный потенциал твердых полезных ископаемых на рубеже XXI века / ВНИГРИ-уголь. Ростов-на-Дону, 2001. С.186-191.

2. *Норватов Ю.А.* Применение имитационного моделирования с целью повышения эффективности опытно-фильтрационных работ / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова, А.С.Степанова // Проблемы геодинамической безопасности (II рабочее совещание) / ВНИМИ. СПб, 1997. С.32-37.

3. *Норватов Ю.А.* Реализация принципа обратной связи методики гидрогеологической разведки с техногенным режимом подземных вод при эксплуатации горнодобывающих предприятий / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова // Тез. докл. X Всерос. угольн. совещ. «Ресурсный потенциал твердых горючих ископаемых на рубеже XXI века» / ВНИГРИ-уголь. Ростов-на-Дону, 2001. С.181-184.

4. *Норватов Ю.А.* Совершенствование методики гидрогеологических исследований на угольных месторождениях / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова // Докл. международного симпозиума по проблемам прикладной геологии, горной науки и производства / Санкт-Петербург. горный ин-т. СПб, 1993. С.72-76.

5. *Петрова И.Б.* Опыт использования струнных манометров для определения фильтрационных параметров горных пород при разведке Орловского буроугольного месторождения / И.Б.Петрова, А.Н.Рюмин, А.С.Миронов // Тез. докл. VII Всесоюзн. угольн. совещания / ВНИГРИ-уголь. Ростов-на-Дону, 1981. С.103-104.

REFERENCES

1. *Norvatov Yu.A*. Optimization of hydrogeological investigations during prospecting and exploitation of coal deposits based on computer technologies / Yu.A.Norvatov, I.B.Petrova, O.I.Norvatova // Collected book «Resource Potential of Solid Minerals at the turn of XXI century» / VNIGRI – coal. Rostov-on-Don, 2001, pp.186-191.

2. *Norvatov Yu.A*. Application of simulation modeling for improvement of pumping tests / Yu.A.Norvatov, I.B.Petrova, A.S.Stepanova // Problems of Geodynamic Safety (II Conference) / VNIMI. Saint-Petersburg, 1997, pp.32-37.

3. *Norvatov Yu.A*. Principle of feedback of hydrogeological prospect and technogenic flow of ground water during exploitation of mining plants / Yu.A.Norvatov, I.B.Petrova // Collected book «Resource Potential of Solid Minerals at the turn of XXI century» / VNIGRI – coal. Rostov-on-Don, 2001, pp.181-184.

4. *Norvatov Yu.A*. Improved methods of hydrogeological study at coal deposits / Yu.A.Norvatov, I.B.Petrova // Reports of International Symposium of Applied Geology, Mining Science and Production / Saint-Petersburg Min. Inst. Saint-Petersburg, 1993, pp.72-76.

5. *Petrova I.B*. Experience in using string pressure gauges for the determination of filtrational parameters of rocks during prospect of the Orlovsk brown coalfield / I.B.Petrova, A.N.Ryumin, A.S.Mironov // Theses of reports of VII All-Union coal Conference / VNIGRI-coal. Rostov-on-Don, 1981, pp.103-104.