Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. /XXX, 1980 г.

УДК 556.343.24 : 622.841.3 : 622.272.5

АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ОБОСНОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕНИСЛАВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПЛЕСЕЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОКСИТОВ

Ф.Г.АТРОЩЕНКО, Е.А.ЛОМАКИН,
А.И.МАЛОВ, В.С.ФОРТЫГИН

Цель работы – комплексный анализ гидрогеологических условий Денисла́вского месторождения подземных вод с учетом возможной одновременной отработки Плесецкого месторождения бокситов. Авторы участвовали в обосновании запасов подземных вод Денисла́вского месторождения. Критический анализ основных этапов решения этой проблемы и составляет содержание работы.

Денисла́вское и Плесецкое месторождения расположены на территории Архангельской области в междуречье рек Емца – Онега – Моша. В гидрогеологическом отношении район приурочен к западному склону Северо-Двинского артезианского бассейна и представляет собой типичную карстовую область с широким развитием толщи существенно обводненных карбонатных пород, объединенных в средне-верхнекаменноугольный водоносный комплекс.

Анализ гидрогеологических условий района показывает, что средне-верхнекаменноугольный водоносный комплекс наиболее перспективен для организации централизованного водоснабжения; однако при обосновании его запасов необходим учет возможного поверхностного загрязнения, а также истощения запасов при осушении Плесецкого месторождения бокситов.

Учитывая, что проблема охраны подземных вод в горнодобывающих районах выдвинулась в последнее время в ряд наиболее важных и, в то же время, наименее изученных, не останавливаясь на всех ее аспектах, выделим, на наш взгляд, наиболее существенный из них: необходимость комплексного рассмотрения вопросов осушения и водоснабжения.

Нами был проведен следующий комплекс исследований:

I. Анализ результатов опытно-фильтрационных работ (ОФР), проведенных в пределах междуречья с целью обоснования эксплуатационных запасов подземных вод Денисла́вского месторождения (работы Юрасской ГРЭ), а также условия осушения Плесецкого месторождения бокситов (работы Плесецкой ГРЭ).

2. Анализ данных опытно-фильтрационных наблюдений (ОФН) за уровнями средне-верхнекаменноугольного водоносного комплекса в паводок и межень, а также информации о интенсивности его разгрузки в долинах рек.

3. Изучение миграционных параметров основного водоносного комплекса (опытно-миграционные работы).

4. Определение коэффициента молекулярной диффузии известняков (лабораторные исследования).

5. Численное моделирование совместной отработки Плесецкого и Денисла-вского месторождений с учетом неоднородности средне-верхнекаменноугольного комплекса по водопроводимости, а также условиям питания.

ОФР, проведенные в пределах месторождений, включали в себя одиночные, кустовые и групповые откачки. Оценивая в целом их результаты, необходимо признать их низкое качество, явившееся следствием методических и технических просчетов, допущенных при их проведении. В качестве основных осложняющих факторов можно выделить следующие:

I) эффект "двойной пористости", вызывающий запаздывание третьего расчетного участка откачки минимум на 5–7 сут;

2) малую, для данных условий, продолжительность откачек при неизменном дебите (обычно не более 5–I0 сут);

3) недостаточный для столь обводненных отложений дебит;

4) недостаточную для данных условий длину водосброса (как правило, не более I00–300 м), что в условиях широкого развития поверхностных форм карста приводило к сбросу откачиваемых вод обратно в опробуемый горизонт и к ложной стабилизации уровней;

5) влияние емкости и кольматации опытных и наблюдательных скважин, обусловившее невозможность обработки первых периодов откачки и восстановления уровня (I0–30 мин).

В такой ситуации анализ ОФР проводился нами на основе сравнения их результатов с эталонной откачкой, в процессе планирования и проведения которой учитывались упомянутые осложняющие факторы. В качестве таковой рассматривалась групповая откачка, проведенная на стадии детальной разведки Денисла́вского месторождения (рис.I).

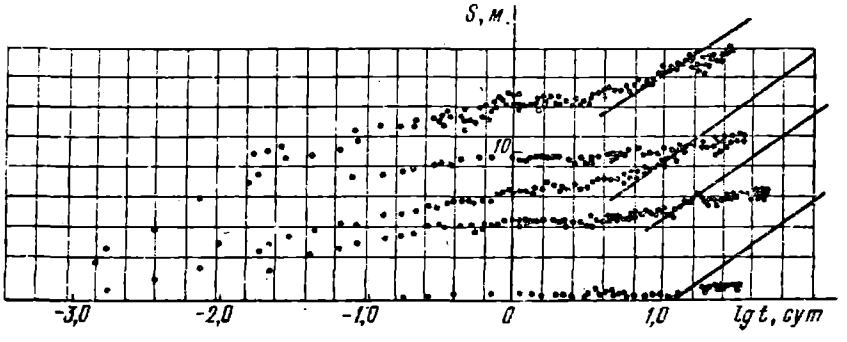


Рис.1. Индикаторные графики временного прослеживания
S – понижение; t – время от начала откачки

Детальный анализ результатов эт й групповой откачки позволил сделать важны выводы методического и практического характера:

I. Информативность одиночных и маломощных кустовых откачек невелика. Например, величина водопроводимости, рассчитанная по результатам одиночных откачек проведенных в районе междуречья, оказалась заниженной примерно в 2-2,5 раза по сравнению с результатами кустовых откачек и данными решения обратной задачи. При проведении маломощных кустовых откачек индикаторные графики не позволяют надежно выделить расчетные участки, что, в совокупности с малыми величинами максимальных понижений уровня, делают графики практически неинтерпретируемыми.

2. Использование методов временного прослеживания уровня для определения расчетных параметров практической ценности не имеет. Это обусловлено влиянием эффектов «двойной пористости" и инерционности скважин; так, даже в условиях эталонной откачки, третий (расчетный) участок сказался мало представительным: его продолжительность не более 2-2,5 t_K (t_K – контрольное время), причем понижение уровня составляет в этот период не более 5-I0 % от максимального. Первый участок графика откачки искажен влиянием инерционности.

Анализ номограммы (рис.2), построенной по результатам численного моделирования [I] для типовых условий групповой откачки, показывает, что даже при отсутствии кольматации ($Ф_{доп} = 0$) влияние инерционности полностью искажает индикаторные графики откачки через I0-20 мин после ее начала.

3. Наиболее надежные результаты могут быть получены при обработке второго «ложностационарного" участка графика S-$\lg t$, а также на основе площадного прослеживания уровня на конец откачки. Данный участок, как правило, достаточно хорошо выражен на графиках временного прослеживания, что позволяет применить для его интерпретации схему с перетеканием [3], учитывающую взаимодействие блоков и трещин.

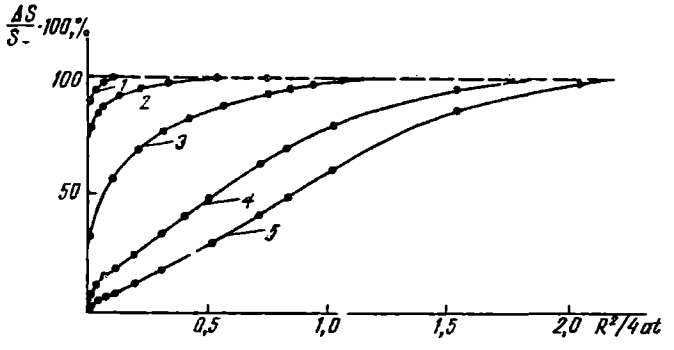


Рис.2. Номограмма погрешности определения понижения по наблюдательному пьезометру от безразмерного параметра $R^2/4at$ при различных величинах дополнительного сопротивления $Ф_{доп}$
R – расстояние от опытной до наблюдательной скважины; a – коэффициент уровнепроводимости; t – время от начала откачки или восстановления уровня; ΔS – разность между точным и наблюдаемым понижением; $S_т$ – точное понижение; 1-5 – соответственно при $Ф_{доп}$, равном 0; 10; 100; 1000; 10000

4. Данные одиночных откачек позволяют лишь качественно обосновать вывод об увеличении водопроводимости к долинам рек, а также с юга на север.

5. Анализ результатов ОФР, выполненных Плесец-

кой КГРЭ, позволил пересмотреть гидродинамическую схему междуречья и, в частности, уменьшить минимум в два раза расчетную величину водопроводимости в районе Плесецкого месторождения. Такое расхождение параметров имеет принципиальное значение для оценки истощения средне-верхнекаменноугольного водоносного комплекса.

Оценивая в целом результаты ОФР, необходимо еще раз подчеркнуть, что ими было охарактеризовано лишь два участка, поэтому для экстраполяции информации о параметрах на возможно большую площадь нами были обработаны результаты ОФН в меженный и паводковый периоды.

Анализ ОФН в меженный период имел своей целью восстановление поля водопроводимости и интенсивности инфильтрации по данным о дебитах родников и уровнях подземных вод. Из теоретических проработок вытекает, что такая задача не имеет единственного решения; для ее корректной постановки весь процесс подбора параметров был разбит нами на два этапа. На первом из них расчет интенсивности инфильтрационного питания проводится на основе данных о модулях подземного стока и карты гидроизогипс междуречья.

Для детализации этих данных были построены крайние ленты тока ограничивающие водосбор Емцы – Онеги – Моши площадью $1{,}77 \cdot 10^9$ м^2. Учитывая, что в пределах рассматриваемой территории нет дополнительных источников питания, а также то, что практически весь подземный поток разгружается в виде источников, получим оценку для интенсивности инфильтрации ($W = 4{,}8 \cdot 10^{-4}$ м/сут или около 30 % от суммы атмосферных осадков). Эта величина соизмерима с рассчитанной по данным гидрометеослужбы (осадки 560 мм в год, испарение 320 мм в год).

В целях дифференциации инфильтрационного питания по площади междуречья (важно, что это является необходимым условием однозначного решения обратной задачи) нами, в пределах рассматриваемой территории, были построены характерные ленты тока, позволившие выделить три зоны неоднородности по инфильтрации.

На втором этапе при известной интенсивности инфильтрационного питания определялось распределение водопроводимости комплекса в пределах площади междуречья. Для этого на основе ОФР были выделены зоны неоднородности. По ним подбирались параметры посредством решения обратной задачи на ЭЦВМ методом наискорейшего спуска

Результаты подбора параметров подтвердили сделанные нами ранее выводы о завышении расчетной величины водопроводимости и, как следствие этого, и притоков в карьер специалистами Плесецкой КГРЭ.

Кроме того, наблюдения за уровнями вод в паводок, независимо от ОФР, позволили определить коэффициент уровнепроводности a на площади, значительно превышающей районы предварительной и детальной разведки. Общеизвестную методику определения a по данным подпора [2], согласно которой коэффициент уровнепроводности находится подбором из соотношения:

$$\Delta H(x,t) = v_0 t R(\lambda), \qquad (1)$$

(здесь $\Delta H(x,t)$ – изменение уровня в наблюдательных пьезометрах, м; v_0 – скорость подъема уровня в граничном пьезометре, м/сут; $R(\lambda)$ – табули-

рейанная функция [5]; $\lambda = x/2\sqrt{at}$) пришлось несколько изменить, так как она справедлива лишь при неизменной интенсивности инфильтрационного питания в пределах расчетного промежутка времени, что в условиях Деницлавского месторождения подземных вод не выполняется: с начала паводка происходит и усиление интенсивности инфильтрационного питания, вызывающее дополнительный подъем уровня. Учитывая сказанное, величина подпора может быть найдена из соотношения [2]

$$\Delta H(x,t)=\frac{Wt}{\mu}[1-R(\lambda_1)]+v_0 t R(\lambda), \qquad (2)$$

где W – интенсивность инфильтрационного питания, м/сут; μ – коэффициент водоотдачи пород; $R(\lambda_1)$ табулированная функция [6]; $\lambda_1=x/2\sqrt{a(t-t_0)}$; x – расстояние от граничного пьезометра до наблюдательного; t и t_0 – время соответственно с начала подъема уровня в пьезометре и с начала спада.

Анализ формулы (2) показывает (см.таблицу), что расчет по стандартной методике, не учитывающей дополнительной инфильтрации, может привести к существенному завышению величины уровнепроводности. Для условий, когда величина подъема уровня за счет усиления инфильтрации соизмерима с подпором, нами предлагается методика, справедливая для значений $W/\mu v$ = = 0,1–0,2 (здесь v – скорость изменения уровня). Сущность предлагаемого подхода заключается в использовании данных о времени максимального подъема уровня в пьезометре. В этом случае можно сформулировать следующую гидродинамическую схему подпора: с момента времени $t = 0$ в граничном пьезометре начинается подъем уровня воды с постоянной скоростью v_0, в это же время «включается» и дополнительное инфильтрационное питание интенсивностью W, затем, начиная с $t = t_0$ отмечается спад уровня с постоянной скоростью v_1. Тогда

$$\Delta H(x,t)=\frac{Wt}{\mu}[1-R(\lambda)]-(v_0-v_1)(t-t_0)R(\lambda_1)+V_0 t R(\lambda). \qquad (3)$$

Продифференцировав уравнение (3) по времени и приравняв $\partial(\Delta H)/\partial t$ нулю, получим достаточно общую зависимость

$$erfc(\lambda)/erfc(\lambda_1)=1+v_1/v_0, \qquad (4)$$

позволяющую подбором определить неизвестную величину уровнепроводности.

С учетом того, что скорости подъема уровня и его спада в граничном пьезометре обычно мало отличаются друг от друга по величине, выражение (4) еще более упрощается: $erfc(\lambda)/erfc(\lambda_1)=2$

Последнее допущение подтверждается также и анализом чувствительности метода к изменению скорости спада по отношению к скорости подъема уровня (рис.3). Для оценки реальной точности предлагаемой методики, а также сравнения ее со стандартной нами, применительно к условиям, типичным для Деницлавского месторождения подземных вод, была решена прямая тестовая задача с учетом дополнительного инфильтрационного питания ($a = 10^5$ м^2/сут; $W = 10^{-3}$ м/сут; $\mu = 3\cdot10^{-2}$; $t = 15$ сут; $v_0 =$ = 0,2 м/сут; v_1 = 0,15 м/сут).

Расчетная зависимость	Расстояние от граничного пьезометра до наблюдательного, м				
	200	500	1000	2000	5000
$\Delta H = V_0 t R(\lambda)$	$1{,}4 \cdot 10^5$	$1{,}6 \cdot 10^5$	$1{,}9 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$	10^6
$\frac{erfc(\lambda)}{erfc(\lambda_1)} = 1 + \frac{V_1}{V_0}$	10^5	10^5	10^5	10^5	$1{,}15 \cdot 10^5$
$\frac{erfc(\lambda)}{erfc(\lambda_1)} = 2$	$7{,}5 \cdot 10^4$	$7{,}5 \cdot 10^4$	$7{,}5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	10^5

С использованием этих данных для определения характерных расстояний между граничным и наблюдательными пьезометрами проведен расчет коэффициента уровнепроводности. Анализ полученных тестовых результатов (см. таблицу) указывает на хорошую точность предложенной методики и на возможность ее использования в случае существенного влияния дополнительного инфильтрационного питания ($W / V_0 \mu = 0{,}1 \div 0{,}2$). Для упрощения подбора уровнепроводности нами построена специальная номограмма (см. рис.3), позволяющая также оценить чувствительность к ошибкам определения времени прихода максимума уровня и отношения скоростей подъема и спада.

Использование разработанной методики позволило найти распределение уровнепроводности в пределах междуречья Емцы – Онеги – Моши.

Таким образом, независимое определение параметров по данным ОФР и ОФН и их хорошая согласованность между собой указывает на достаточно надежное и полное определение фильтрационных свойств водовмещающих пород. Это позволило решить прогнозную задачу об условиях совместной эксплуатации Дениславского и Плесецкого месторождений на основе математического моделирования при помощи разработанной нами программы. Результаты моделирования показали, что одновременная отработка месторождений не вызовет истощения водоносного горизонта (понижения в скважинах не превышают 50 % первоначальной мощности горизонта).

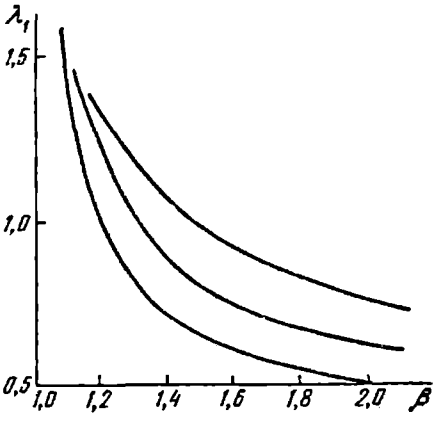


Рис.3. Номограмма подбора коэффициента уровнепроводности
β – безразмерный коэффициент времени

Особым вопросом при расчете эксплуатационных запасов в условиях слабой защищенности месторождения от возможного поверхностного загрязнения является обоснование зоны санитарной охраны водозабора. Поэтому в целях выяснения закономерностей массопереноса загрязняющих компонентов был проведен комплекс миграционных опытов в полевых и лабораторных условиях. В полевых условиях определялся коэффициент активной трещиноватости n известняков.

Характерные данные опытов по изменению концентрации индикатора во времени в улавливающей скважине:

Время от момента запуска t, мин	27	28	32	34	37	42	47	55
Текущая концентрация C мг/л	0,6	1,3	5,5	4,6	2,3	1,8	1,2	0,6-0,7

Величина активной трещиноватости определялась из балансового соотношения

$$Qt = Vn\ , \tag{5}$$

где Q – дебит скважины; t – время фиксации максимума концентрации; V – объем активной зоны трещиноватости, $V = \pi R^2 h$; R = 16 см; h – мощность зоны активной трещиноватости, определяемая скважинной расходометрией (h= = 17–30 м, при общей обводненной мощности около 80 м).

Результаты обработки опытных данных ($n \approx 0{,}04 \div 0{,}01$) говорят о значительной трещиноватости и закарстованности пород.

Для определения величины коэффициента молекулярной диффузии известняков карбона были отобраны монолиты ненарушенной структуры. Опыт проводился на двухкамерной установке, разработанной в ЛПИ. Наблюдения за изменением концентрации индикатора в камерах велись потенциометрическим методом. При использовании указанной схемы опыта коэффициент молекулярной диффузии определялся по формуле [4]

$$D_M = \frac{Vd_0}{2S_0 t} \cdot 2{,}3 \lg \frac{C_2^0 - C_1^0}{C_2 - C_1} \tag{6}$$

где V_K – объем камеры; d_0 и S_0 – длина и площадь поперечного сечения образца; C_1^0 и C_2^0 – начальные концентрации индикатора в камерах прибора; C_1 и C_2 – текущие концентрации, фиксируемые в ходе опыта.

Получены следующие данные:

t, сут	0		2	6	8	10	13	15
C_1, мг/л	3550	3483	3162	3483	3467	3364	3256	3203
C_2, мг/л	0,7	21	25,64	51	64	62	86	100
$\lg C_2/C_1$	0	0,01	0,013	0,0138	0,0175	0,03	0,048	0,0578

Средняя величина коэффициента молекулярной диффузии по данным опытов $(1{,}5 \div 3{,}7) \cdot 10^{-5}$ м^2/сут.

Знание емкостных свойств водовмещающих пород и коэффициента диффузии позволяет рассчитать зону санитарной охраны водозабора. В первом приближении можно воспользоваться решением Ловерье, применительно к трещиновато-пористым средам оно имеет вид

$$\bar{C} = \operatorname{erfc}\left(\frac{xS_б}{2v}\sqrt{\frac{D_M n_0}{t - \frac{nx}{V}}}\right) \tag{7}$$

где x – расстояние переноса, отсчитываемое от источника загрязнения; $S_Б$ – удельная поверхность блоков, $S_Б = 6/m_Б$, если блоки имеют кубическую форму; $m_Б$ – расстояние между трещинами; v – скорость фильтрации; t – время переноса.

Ведя расчет продвижения условного фронта поршневого вытеснения ($C_2 / C_1 = 0,5$), получим зависимость для времени переноса

$$t = \frac{x}{v}\left(n_0 D_м S_Б^2 \frac{x}{v} + n\right) \qquad (8)$$

Исходные данные для расчета взяты нами из результатов уже проанализированных выше исследований: $v = 0,2$ м/сут; $S_Б = 1$ м$^{-1}$, так как, согласно расходометрии, ориентировочный размер блоков около 5 м; $n_0 = 0,3$ и $D_м = 2 \cdot 10^{-5}$ м^2/сут. Следовательно,

$$t = \frac{x}{0,2}\,(3 \cdot 10^{-5} x + 0,005).$$

Таким образом, расчетное время переноса загрязнения на расстояние 9 км около 40 лет, т.е. за время эксплуатации водозабора качество подземных вод не ухудшится, если границы зоны санитарной охраны будут расположены на расстоянии 8–9 км вверх по потоку. Данный вывод, однако, справедлив лишь для загрязнений, усваиваемых пористыми блоками, в противном случае необходимо ориентироваться на схему конвективного переноса с коэффициентом пористости, равным активной трещиноватости.

Проведенный комплексный анализ результатов опытно-фильтрационных и опытно-миграционных работ с последующим моделированием гидрогеологических условий, нарушенных эксплуатацией, позволил достаточно обоснованно оценить запасы подземных вод Деннславского месторождения (защищены в ГКЗ в 1978 г.), а также разработать конкретные мероприятия по охране подземных вод месторождения от истощения и загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

. Ломакин Е.А., Мироненко В.А. Исследование оптимальных схем математического моделирования геофильтрационных задач. Тезисы докладов Всесоюзного семинара по вопросам моделирования процессов переноса подземных вод. М., Изд-во МГУ, 1978, с.8–14.

2. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. М., Изд-во МГУ, 1968. Т.2. С.120–123.

3. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М., Недра, 1978. 328 с.

4. Мироненко В.А., Сердюков Л.И. Применение метода интегральных соотношений при анализе результатов опытных откачек в слоистых толщах. – Изв. вузов. Геология и разведка, 1969, № 11, с.86–93.

Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М., Изд-во МГУ, 1973. 327 с.