

УДК 556.3.01

Малков А.В. (филиал ФГБУ «Гидроспецгеология» Южный региональный центр государственного мониторинга состояния недр), **Першин И.М., Помеляйко И.С.** (Северо-Кавказский федеральный университет)

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

*Предлагается методика оперативного управления режимами эксплуатации месторождений (участков) подземных вод, основанная на гидрогеологическом мониторинге. Суть метода заключается в формировании целевой функции и обосновании метода прогнозирования динамики развития гидрогеологических процессов. Преимущество метода объясняется независимостью от сроков эксплуатации месторождения, оперативностью внесения изменений в режим эксплуатации, в зависимости от фактического режима, даже в том случае, когда объект изучен в недостаточной степени, поскольку геологическая информация является весьма дорогой и приходится иметь дело с ее дефицитом. **Ключевые слова:** оперативное управление, гидравлические методы прогнозирования, математическое моделирование, целевая функция, геолого-экологическое районирование.*

Malkov A.V. (Branch of FSBI «Hydrospegeology» Southern Regional Center of State monitoring the state of the subsoil), Per-shin I.M., Pomelyayko I.S. (North Caucasus Federal University)

THE OPERATIONAL MODE MANAGEMENT UNDERGROUND WATER OPERATIONS

*A technique is proposed for the operational management of the operating regimes of underground water deposits (plots) based on hydrogeological monitoring. The essence of the method is to formulate the objective function and justify the method for predicting the dynamics of the development of hydrogeological processes. The advantage of the method is explained by independence from the terms of the field's exploitation, the speed of making changes to the mode of operation, depending on the actual mode, even when the object is not sufficiently studied, since geological information is very expensive, and you have to deal with her deficit. **Keywords:** operational management, hydraulic forecasting methods, mathematical modeling, objective function, geological and ecological zoning.*

Месторождения (участки) подземных вод проходят экспертизу запасов в Государственной комиссии по запасам РФ (ГКЗ) или его филиалах в зависимости от уровня значимости и объемов. Такая оценка запасов может производиться на срок от 10 до 25 лет. При этом

делаются соответствующие расчеты по гидродинамическим, гидравлическим методам или методом математического моделирования.

В гидрогеологической практике всегда сталкиваются с дефицитом информации, поскольку бурение сети наблюдательных скважин обходится дорого, и количество точек наблюдения всегда ограничено. Кроме того, геологические объекты отличаются от других тем, что их строение до конца не изучено.

На определенных этапах эксплуатации могут проявиться неучтенные ранее граничные условия или иные особенности геологической среды, которые на момент утверждения запасов никак не проявились и, естественно, не могли быть учтены в расчетах. В этом случае вполне возможны ошибки в прогнозировании объемов добычи на расчетные периоды упреждения, которые могут повлечь за собой серьезные ошибки (истощение запасов, ухудшение кондиций или бактериологических показателей подземных вод).

Конечно, это не отменяет необходимость оценки (переоценки) запасов, она должна выполняться в любом случае, однако это только часть задачи.

Предлагается при эксплуатации месторождений (участков) ввести оперативное управление, суть которого заключается в следующем.

Положим, что эксплуатация месторождений подземных вод осуществляется исходя из некоторых ограничений, полученных на первых этапах изучения месторождения (предельное понижение, допустимая разница между динамическими уровнями смежных водоносных горизонтов, кондиционный состав подземных вод, санитарно-гигиенические требования и др.). Эти ограничения оцениваются по данным эколого-гидрогеологического районирования месторождения, в объем которого входят анализ техногенной нагрузки, выделение зон с различной экологической защищенностью, допустимые понижения динамического уровня и др. Положим также, что некоторые элементы эколого-гидрогеологического районирования были ошибочны, что вполне возможно, особенно в сложных геолого-гидрогеологических условиях.

В такой ситуации следует исходить из реального режима эксплуатации, который оценивается по гидрогеологическому мониторингу, проведение которого согласно «Закону о недрах» должен выполняться для любых месторождений (жидких, твердых, газообразных) и на всем протяжении эксплуатации месторождений (участков).

Для оперативного управления необходимо, во-первых, сформулировать целевую функцию, во-вторых — обосновать прогностическую модель, неважно какую (гидродинамическую, гидравлическую, моделирование).

Целевая функция

Положим, что состояние системы зависит от N параметров x_1, x_2, \dots, x_N , на которые накладываются некоторые ограничения $\alpha_i \leq x_i \leq \beta_i$. Рассматривается некоторая функция F (целевая функция), зависящая от этих параметров $F = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$.

Требуется найти точку $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0)$ в N -мерном пространстве, принадлежащую области V_d , в которой значение критерия оптимальности экстремально [4]:

$$\begin{aligned} F &= F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0) \rightarrow \text{extr} \\ \alpha_i &\leq x_i \leq \beta_i \\ \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0\} &\in V_d. \end{aligned} \quad (1)$$

Оптимальный режим эксплуатации объекта не означает, что функционирование всех его элементов должно быть оптимальным. Для получения решения вполне достаточно, чтобы один из критериев, наиболее важный для данной задачи, и принятый за целевую функцию, был оптимален. Остальные могут представляться в виде системы ограничений или не учитываться вообще.

Как показывает практика, все многообразие критериев можно объединить в две группы. Первая из них связана с оптимизацией технологических процессов добычи, технических или экономических условий эксплуатации инженерного оборудования. Их можно назвать технико-экономическими. Это не строгие критерии. Несоблюдение их ведет в основном к экономическим потерям, не отражаясь существенным образом на состоянии геологического объекта в целом.

Вторая группа объединяет критерии, которые прямо или косвенно определяют уровень активности техногенных процессов, характеризующихся устойчивыми негативными тенденциями или необратимостью. Эти критерии используются при формировании целевой функции, системы ограничений, оценки экологического потенциала объекта. Под последним термином следует понимать способность сохранять качественный состав и ресурсы подземных вод в условиях техногенного воздействия [10, 12, 13]. С этой целью выполняется так называемое эколого-гидродинамическое районирование, в задачи которого входит пространственное отображение основных факторов и обоснование доминирующего. На схеме районирования в обязательном порядке отражаются:

1. Особенности техногенной нагрузки.
2. Характер гидравлической связи подземных и поверхностных вод.
3. Пространственные закономерности и структура подземного потока.

Районирование представляется в виде карт (схем) и позволяет установить предельный уровень безопасной нагрузки на различные зоны объекта, сформулировать систему ограничений.

Целевая функция с математических позиций, выглядит следующим образом [6, 9]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{\text{сум}} \\ F = H_i(t_k) \leq H_{id} \\ 0 < Q_i \leq Q_{\text{max}} \\ m_{\text{min}} \leq m_c \leq m_{\text{max}} \end{cases} \quad (2),$$

где $H_i(t_k)$ — положение динамического уровня в i -той скважине на конечный (расчетный) момент времени t_k .

Однако для оперативного управления она малоприменима. Во-первых, неизвестно какое должно быть положение динамического уровня на текущий момент времени. Ясно, что в диапазоне времени $0 \leq t \leq t_k$ оно должно быть меньше предельно допустимого H_{id} , однако какое конкретно неизвестно. Во-вторых, предельное положение уровня привязывается к расчетным срокам эксплуатации t_k , которое, согласно нормативам, принимается равным, как правило, 10 или 25 лет, но соответствует ли это фактическому положению дел, вопрос открытый. Дело в том, что геологические объекты довольно сложны по своему строению. Многие факторы, формирующие гидродинамический и гидрогеохимический режим, на ранних стадиях изучения объекта никак не проявляются и не могут быть учтены в модели. Они начинают оказывать влияние на более поздних этапах изучения и требуют систематической корректировки как самой модели, так и режимов эксплуатации.

Здесь проще поступить иначе. Положим, что известно предельное положение уровня в любом водозаборном сооружении, никак не привязанное к нормативным срокам эксплуатации объекта. Это предельный уровень, который обеспечивает сохранение кондиций и предотвращение истощения запасов. Известна заявленная потребность в воде, а, следовательно, и суммарный водоотбор. Независимо от конечных сроков эксплуатации обеспечим такое распределение общего водоотбора между каптажными сооружениями, чтобы на любой текущий момент времени (t) выполнялось условие:

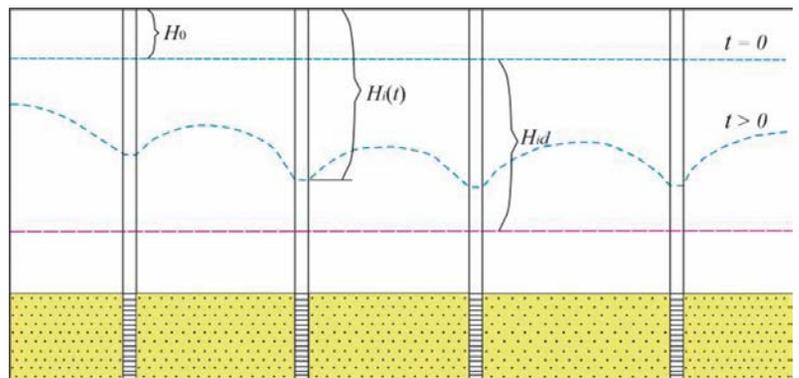


Рис. 1. Расчетная схема положения динамического уровня



Рис. 2. Общая схема управления режимами эксплуатации

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{\text{сум}} \\ F = \sum_{i=1}^n \left(k_0 - \frac{H_i(t)}{H_{id}} \right)^2 \rightarrow \min \\ 0 < Q_i \leq Q_{\text{max}} \\ m_{\text{min}} \leq m_c \leq m_{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

где: $H_i(t)$ — текущее положение динамического уровня; k_0 — некоторый коэффициент пропорциональности. При $F = 0$ система (3) переписывается в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{\text{сум}} \\ k_0 = \sum_{j=1}^n \frac{H_i(t)}{H_{id}} \\ 0 < Q_i \leq Q_{\text{max}} \\ m_{\text{min}} \leq m_c \leq m_{\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

Фактически (4) означает, что оптимальным режимом эксплуатации является такой, который обеспечивает одинаковое соотношение динамического уровня к предельно допустимому во всех каптажах (при стационарном режиме), или же равномерную и пропорциональную сработку его (нестационарный режим). То есть, предельное положение уровня во всех точках будет достигнуто одновременно (рис. 1). На рис. 2 изображена общая схема управления режимами эксплуатации месторождения (участка).

Для прогнозирования динамического уровня могут использоваться (в зависимости от сложности геолого-гидрогеологического строения) самые различные модели.

Гидравлический метод

Согласно решению [8], независимо от граничных условий, понижение динамического уровня в скважине может быть определено по формуле:

$$S_t = S_0 \cdot \frac{Q_t}{Q_0} \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^\beta \quad (5),$$

где S_t — понижение уровня на текущий момент времени t ; S_0 — понижение уровня на момент окончания опытных работ; Q_0 — дебит скважины на момент окончания опытных работ t_0 ; Q_t — текущий (прогнозный) дебит; β — эмпирический коэффициент, определяемый как угловой коэффициент графика $Lg(S/Q) \div Lg(t)$ на этапе опытно-фильтрационных работ.

Как пример, в таблице представлены результаты опытно-фильтрационных работ (ОФР) по скважинам Березовского участка Кисловодского месторождения минеральных углекислых вод (скв. № 7-РЭ и № 7-БЭ, удаленных друг от друга на расстоянии 14 м). Продолжительность ОФР составляла 188,95 сут. Откачка производилась из скважины № 7-РЭ, наблюдения за динамикой уровня — по обеим скважинам.

По данным таблицы были построены вспомогательные графики для определения параметра β по обоим скважинам в координатах $Lg(S/Q) \div Lg(t)$, они представлены на рис. 3. Для интерпретации использовался период с 19,88 сут. по 188,95 сут. Полученные значения $\beta_{7-РЭ} = 0,159$; $\beta_{7-БЭ} = 0,177$.

Оценка корректности вычислений определялась по данным ретроспективы за указанный период. Результаты сопоставления расчетных и фактических динамических уровней представлены графически на рис. 4. Цифровой материал дан в таблице (два последних столбца).

По опыту эксплуатации

При наличии достаточно длительных рядов наблюдения за режимами эксплуатации месторождений подземных вод можно использовать метод, разработанный Ф.М. Бочевеком [1].

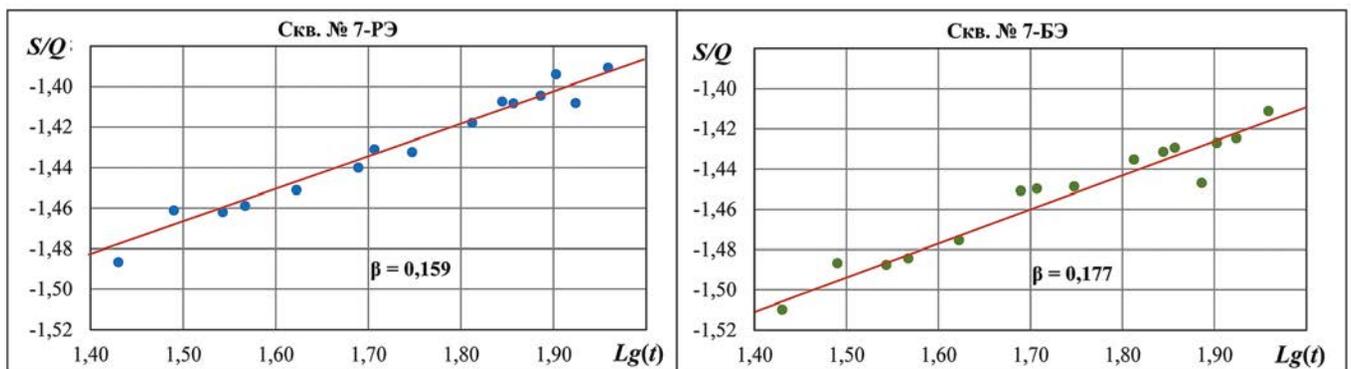


Рис. 3. Вспомогательные графики для определения параметра β

Результаты ОФР по скважинам Березовского участка

t он, сут.	lgt	Q м³/сут.	H _{7-РЭ} , м	H _{7-БЭ} , м	S/Q 7-РЭ	S/Q 7Б-Э	Lg(S/Q) 7-РЭ	Lg(S/Q) 7БЭ	H расч. 7-РЭ	H расч. 7-БЭ
0,0			3,5	0,1						
19,8854	1,2985	269	11,62	7,76	0,0302	0,0285	-1,5202	-1,5455	11,76	8,07
26,934	1,4303	259,4	11,96	8,12	0,0326	0,0309	-1,4866	-1,5098	11,86	8,17
30,9167	1,4902	251,57	12,2	8,3	0,0346	0,0326	-1,4611	-1,4868	11,79	8,1
34,9271	1,5432	253,84	12,26	8,36	0,0345	0,0325	-1,4621	-1,4876	12,03	8,33
36,9063	1,5671	253,14	12,3	8,4	0,0348	0,0328	-1,4589	-1,4843	12,08	8,38
41,9271	1,6225	250,36	12,36	8,48	0,0354	0,0335	-1,4511	-1,4753	12,16	8,46
48,9271	1,6895	251,8	12,64	9,02	0,0363	0,0354	-1,4401	-1,4507	12,43	8,71
50,9271	1,7069	249	12,73	8,94	0,0371	0,0355	-1,431	-1,4497	12,39	8,67
55,9271	1,7476	249,8	12,73	8,99	0,0369	0,0356	-1,4324	-1,4487	12,55	8,83
64,9375	1,8125	255,78	13,27	9,49	0,0382	0,0367	-1,418	-1,4352	12,99	9,26
69,9271	1,8446	255,73	13,51	9,57	0,0391	0,037	-1,4074	-1,4314	13,1	9,36
71,9271	1,8569	255	13,46	9,59	0,0391	0,0372	-1,4083	-1,4293	13,12	9,38
76,934	1,8861	253,05	13,47	9,14	0,0394	0,0357	-1,4045	-1,447	13,15	9,41
79,9271	1,9027	252,92	13,71	9,56	0,0404	0,0374	-1,394	-1,4271	13,2	9,46
83,934	1,9239	248,32	13,2	9,44	0,0391	0,0376	-1,4082	-1,4247	13,1	9,36
90,9688	1,9589	253,3	13,8	9,93	0,0407	0,0388	-1,3908	-1,4111	13,42	9,67
97,9271	1,9909	220,25	12	9	0,0386	0,0404			12,23	8,52
104,9271	2,0209	265,71	14,11	10,27	0,0399	0,0383	-1,3987	-1,4171	14,15	10,37
107,9479	2,0332	258,54		10,35		0,0396		-1,4018	13,91	10,14
111,9479	2,049	239,75	13,9	10,2	0,0434	0,0421	-1,3627	-1,3754	13,21	9,46
114,9271	2,0604	251,41	14,3	10,2	0,043	0,0402	-1,367	-1,3961	13,72	9,96
118,9271	2,0753	102,75	7,68	3,95	0,0407	0,0375	-1,3906	-1,4263	7,7	4,15
125,9271	2,1001	167	10,5	7	0,0419	0,0413	-1,3776	-1,3839	10,39	6,75
128,9479	2,1104	250	12,83		0,0373	-0,0004	-1,4281		13,85	10,09
132,9479	2,1237	123,63	8,38	4,8	0,0395	0,038	-1,4037	-1,42	8,65	5,06
135,9479	2,1334	167,33	11	8	0,0448	0,0472	-1,3485	-1,326	10,49	6,84
139,9479	2,146	260,75	14,6	10,5	0,0426	0,0399	-1,3709	-1,3992	14,44	10,65
142,9688	2,1552	252,91	13,69	9,9	0,0403	0,0387	-1,3948	-1,4117	14,15	10,37
146,9479	2,1672	254,32	14,01	10,15	0,0413	0,0395	-1,3838	-1,4032	14,26	10,47
149,9479	2,1759	237,67	13,8	10,21	0,0433	0,0425	-1,3631	-1,3712	13,58	9,83
153,9479	2,1874	242	14,1	10,3	0,0438	0,0421	-1,3585	-1,3752	13,81	10,05
160,9479	2,2067	228,14	13,5	10	0,0438	0,0434	-1,3582	-1,3626	13,29	9,54
163,9479	2,2147	247	14,3	10,6	0,0437	0,0425	-1,3593	-1,3715	14,13	10,35
167,9479	2,2252	248,25	14,52	10,61	0,0444	0,0423	-1,3527	-1,3733	14,22	10,45
170,9479	2,2329	246	14,2	10,62	0,0435	0,0428	-1,3616	-1,3689	14,16	10,38
177,9479	2,2503	225,33	13,7	10	0,0453	0,0439	-1,3442	-1,3572	13,33	9,58
181,9479	2,2599	235,75	14	10,2	0,0445	0,0428	-1,3513	-1,3681	13,82	10,05
188,9479	2,2763	248,46	14,5	10,9	0,0443	0,0435	-1,3539	-1,3618	14,44	10,65

$$H_i(t) = H_{0i} - C_i \cdot Q_i - \sum_{j=1}^n \nabla C_j \cdot Q_j + V_s \cdot t \quad (6),$$

где $H_i(t)$ — положение динамического уровня в рассматриваемой скважине; H_{0i} — понижение уровня, вызванного откачкой из данной скважины с расходом Q_i в

условиях ее одиночной работы; V_s — среднемноголетние темпы изменения динамического уровня; t — текущее время, принятое от какого-либо начального момента.

Как пример на рис. 5 представлено решение по скважине № 107 ДР Северного фланга Центрального

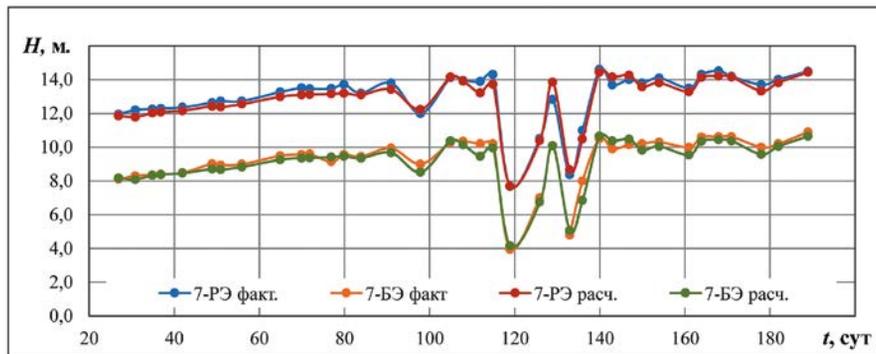


Рис. 4. Сопоставление фактических и расчетных понижений уровня

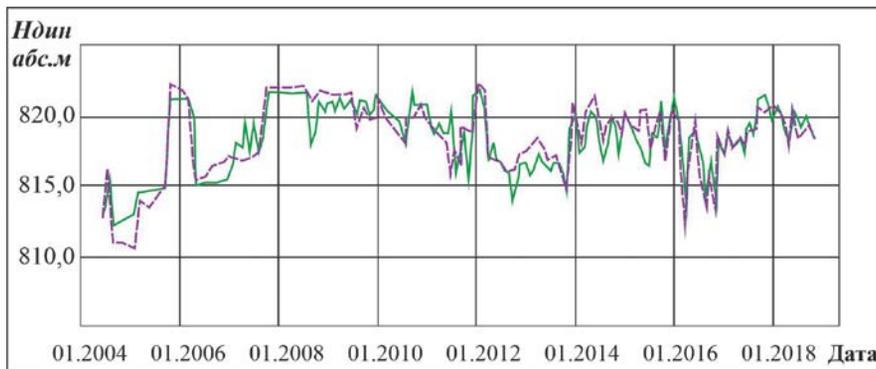


Рис. 5. Сопоставление фактических и расчетных уровней по скважине № 107-ДР

участка. Все параметры, входящие в уравнение, оцениваются непосредственно по фактическим наблюдениям. Уравнение регрессии имеет вид:

$$H_{107DR} = 820,96 - 0,0448 \times Q_{107DR} - 0,0173 \times Q_{107D} - 0,0004 \times Q_{107P} + 0,2 \times t_{год}$$

Метод математического моделирования

Математические модели строятся на принципах сохранения энергии или баланса; чаще всего, это так называемые динамические модели, в основе которых лежит описание объекта дифференциальными уравнениями с определяемыми по эмпирическим данным параметрами. Математические модели несравненно более трудоемки по сравнению с гидравлическими, требуют значительно большего объема информации и знаний об объекте, однако и преимущества их перед гидравлическими очевидны. Они довольно точно описывают физику геофильтрационного процесса, на их основе можно выполнять балансовые расчеты, прогнозировать динамику массопереноса. В общем случае система исходных дифференциальных уравнений, описывающих плоско-пространственный процесс фильтрации и массопереноса, при некоторых допущениях, может быть представлена следующим образом [2, 3, 4, 5]:

$$\begin{cases} \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} = km_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + km_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + b_{k-1}(H_{k-1} - H) + b_{k+1}(H_{k+1} - H) \\ n_3 \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{V_{zn} \cdot (C - C_n)}{m} + \frac{V_{zk} \cdot (C - C_k)}{m} \end{cases} \quad (7),$$

где: μ^* — водоотдача пласта; b_k , b_n — параметр перетекания относительно водоупорного пласта, залегающего в кровле и подошве; H — напор в изучаемом водоносном горизонте; H_k , H_n — напоры в смежных водоносных горизонтах: кровле и подошве соответственно; km — водопроводимость пласта; m — мощность водоносного горизонта; V_{zn} , V_{zk} — скорости перетекания воды через кровлю и подошву пласта соответственно; n_3 — эффективная пористость. Эффективная пористость представляет собой: $n_3 = (n_a + 1)/\beta$, где β — коэффициент распределения при сорбции.

Моделирование процессов геофильтрации и геомиграции проводилось для всего Кисловодского месторождения минеральных вод [7, 8, 11]. Расчетная схема представлена на рис. 6. Для моделирования использовалась программа Mod Tech. Результаты моделирования изображены графически на рис. 7, 8.

Как следует из сопоставления, для месторождений IV группы сложности динамика уровня укладывается в достаточно точный диапазон. Что же касается минерализации, то здесь ситуация существенно сложнее. Это объясняется использованием табличных данных параметров миграции, определение которых опытно-фильтрационными и натурными наблюдениями связаны с большими техническими и финансовыми затратами. Расхождения по ряду скважин существенные, однако для оперативного управления математическое моделирование, даже для такого сложного объекта как Кисловодское месторождение (IV группа сложности) вполне возможно, поскольку периоды упреждения незначительны, и имеют своей целью систематическое поддержание текущих режимов эксплуатации на заданном уровне и с учетом верификации модели.

Выводы

Оперативное управление представляет собой самостоятельный вид гидрогеологических работ, направленный на поддержание необходимых режимов эксплуатации, обеспечивающих заданные кондиции качественных и бактериологических показателей подземных вод.

Оперативное управление не привязано к каким-либо определенным срокам эксплуатации месторождения. Даже при наличии существенных ошибок при прогнозировании процессов фильтрации и миграции на длительную перспективу, оперативное управление позволяет предотвратить нежелательные последствия,

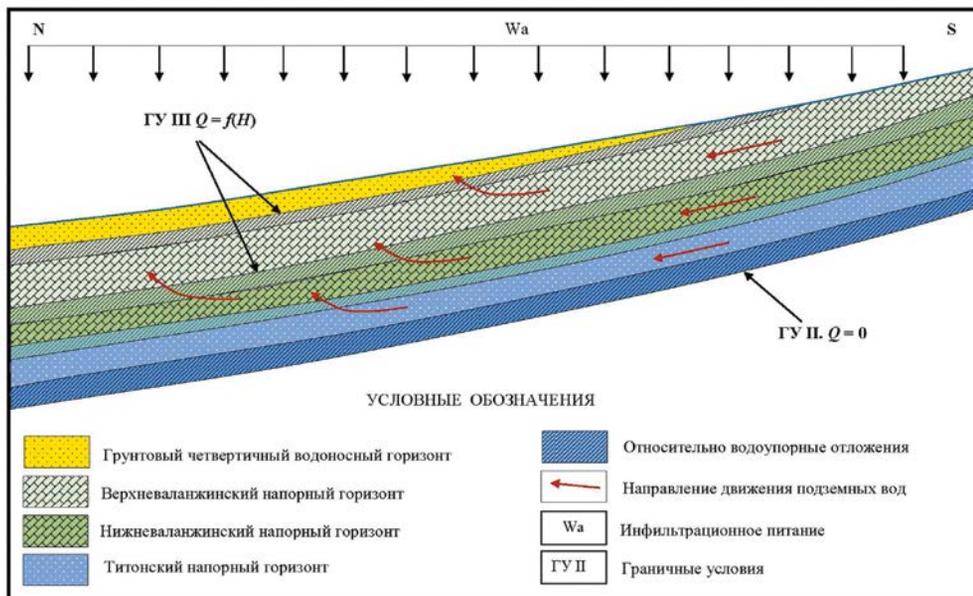


Рис. 6. Расчетная схема процессов геофильтрации и геомиграции вод Кисловодского месторождения

имея данные гидрогеологического мониторинга, который и является основным источником информации для оперативного управления.

должны чередоваться. С поступлением новой информации прогностическая модель должна корректироваться.

Оперативное управление может базироваться на любых прогностических моделях фильтрации и миграции. Вопрос только в сложности геолого-гидрогеологических условий и желаниях автора, хотя априори можно утверждать, что наиболее предпочтительными являются гидравлические модели.

Оперативное управление должно базироваться на основных принципах моделирования. В частности, речь идет о верификации. То есть, процедуры прогнозирования и корректировки прогностической модели

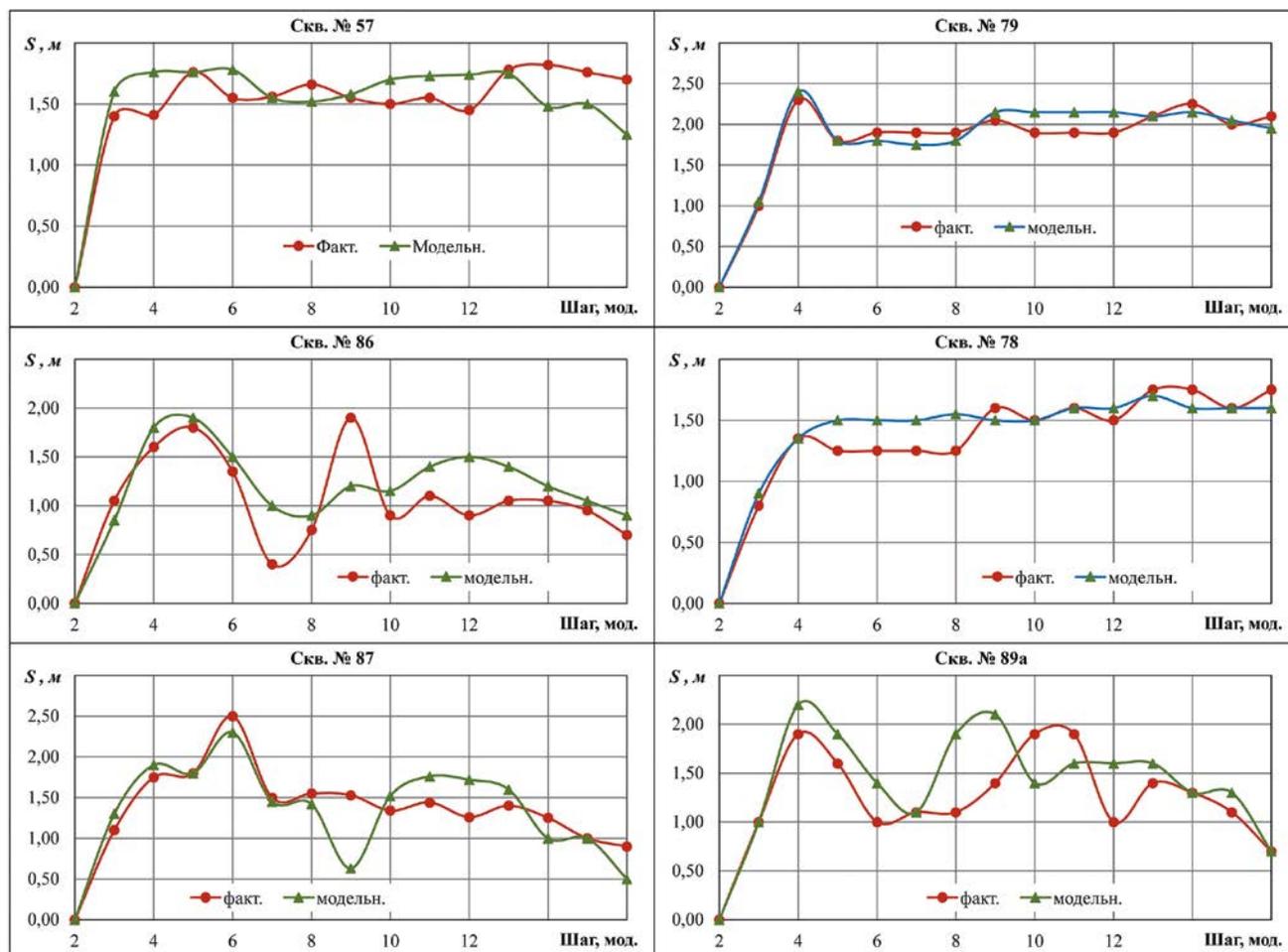


Рис. 7. Сопоставление модельных и фактических динамических уровней по наблюдательным скважинам Кисловодского месторождения

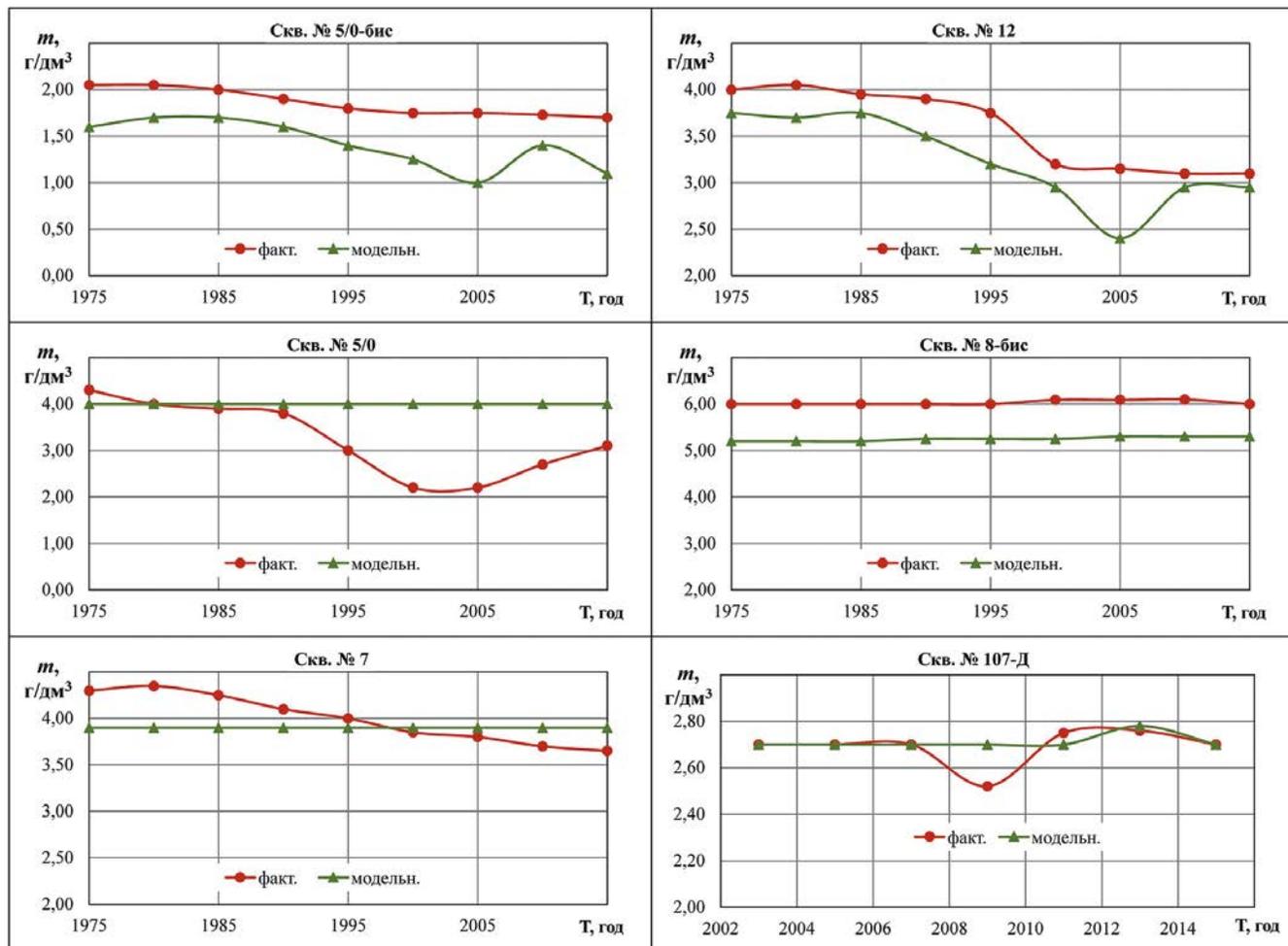


Рис. 8. Сопоставление модельной и фактической минерализации по эксплуатационным скважинам Кисловодского месторождения

Оперативное управление возможно только с использованием компьютерных технологий. Это обеспечивает наиболее эффективный процесс управления и поддержания необходимых режимов эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочевер, Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод / Ф.М. Бочевер. — М.: Недра, 1968. — 325 с.
2. Бочевер, Ф.М. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений / Ф.М. Бочевер, А.Е. Орадовская. — М.: Недра, 1972. — 128 с.
3. Гавич, И.К. Моделирование гидрогеологических процессов / И.К. Гавич. — М.: Московский геологоразведочный институт, 1977. — 101 с.
4. Гавич, И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии / И.К. Гавич. — М.: Недра, 1980. — 358 с.
5. Гавич, И.К. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич. — М.: Недра, 1988. — 350 с.
6. Малков, А.В. Синтез систем с распределенными параметрами / А.В. Малков, И.М. Першин. — М.: Научный мир, 2012. — 472 с.
7. Малков, А.В. Кисловодское месторождение минеральных вод / А.В. Малков, И.М. Першин, И.С. Помеляйко. — М.: Наука, 2015. — 282 с.
8. Малков, А.В. Применение математического моделирования процессов геофильтрации и геомиграции на месторождениях минеральных вод IV группы сложности (Кисловодское месторождение) / А.В. Малков, И.С. Помеляйко, В.Ф. Дубогрей // Изв.

высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2016. — № 1. — С. 92–98.

9. Малков, А.В. Методика подсчета запасов и баланса подземных вод гидравлическим методом / А.В. Малков, И.М. Першин, И.С. Помеляйко // Недропользование XXI век. — 2016. — № 4. — С. 78–88.
10. Малков, А.В. Проблемы экологической безопасности гидроминеральной базы курорта Кисловодск / Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация): Сб. докладов. 3-й Национальный научный форум «НАРЗАН-2015» / А.В. Малков, И.М. Першин, И.С. Помеляйко. — Кисловодск, 2015. — С. 92–116.
11. Помеляйко, И.С. Гидроминеральная база Кисловодского месторождения углекислых минеральных вод: проблемы и пути решения / И.С. Помеляйко, А.В. Малков, И.М. Першин // Экология Кавказских Минеральных Вод: системный анализ и концептуальные подходы. — СПб-Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2016. — С. 163–177.
12. Помеляйко, И.С. Проблемы качества поверхностных и подземных вод курортов региона Кавказских Минеральных Вод и пути их решения / И.С. Помеляйко, А.В. Малков // Водные ресурсы. — 2019. — Т. 46. — № 2. — С. 214–225.
13. Помеляйко, В.И. Состояние гидроминеральной базы курорта федерального значения Кисловодска / В.И. Помеляйко, И.С. Помеляйко // Изв. высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2012. — № 2. — С. 29–37.

© Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С., 2021

Малков Анатолий Валентинович // Anatol.Malkov@yandex.ru
Першин Иван Митрофанович // ivmp@yandex.ru
Помеляйко Ирина Сергеевна // i.pomelyayko@yandex.ru