

А.В. Малков
д-р техн. наук
канд. геол.-мин. наук
ООО Нарзан-гидроресурсы
директор
Anatol.Malkov@yandex.ru



И.М. Першин
д-р техн. наук
профессор
СКФУ
проректор по научной работе
ivmp@yandex.ru

Обоснование экологически безопасных режимов эксплуатации минеральных вод района КМВ

Рассмотрены вопросы управления процессами эксплуатации подземных вод, обеспечивающего сохранение нормальной экологической обстановки в районе месторождения

In this article are examined the questions of the processes underground water exploitation management, which maintain the normal ecological situation in the area of the deposit

Ключевые слова: целевая функция, эколого-гидрогеологическое районирование, математическая модель, фильтрационные и емкостные параметры

Keywords: special-purpose function, ecologically-hydrogeologically dividing into districts, mathematical model, filtration and capacitive parameters

Район Кавказских Минеральных Вод (КМВ), имеющий статус особо охраняемого эколого-курортного региона, занимает особое место среди курортных регионов России благодаря богатству, разнообразию, количеству и ценности минеральных вод, ландшафтных и климатических условий, лечебных грязей. В административном отношении он входит в состав Южного федерального округа России и размещен в границах Ставропольского края.

Наиболее важными источниками минеральных вод, имеющих известность далеко за пределами России, являются месторождения Кисловодска («нарзан»), Ессентуков («ессентуки

№ 4, № 17, № 20»), Железноводска («славяновская», «славянская»), приуроченные к юрским, меловым и палеогеновым отложениям. Геолого-тектонические особенности территории отразились в особенностях формирования химизма и гидродинамического режима минеральных вод источников. В основном, это углекислые или слабоуглекислые минеральные воды, довольно пестрые по химическому составу, с широким спектром бальнеологических свойств. Пьезометрические напоры водоносных горизонтов располагались выше поверхности земли, что обеспечивало долгое время высокую степень защищенности минеральных источников от вторжения грунтовых



и поверхностных вод, санитарно-гигиеническое состояние которых никак нельзя признать удовлетворительным.

За последние 20 лет объем добычи минеральных вод увеличился почти вдвое, что существенным образом изменило общую картину распределения природных вертикальных гидравлических градиентов в верхней части гидrolитосферы. Дело в том, что гидравлическая связь между водоносными горизонтами достаточно тесная, и в зонах интенсивного технического воздействия на гидrolитосферу вертикальные гидравлические градиенты поменяли свое направление на противоположное. Это означает, что на этих участках вертикальный водообмен будет наблюдаться в направлении сверху вниз, что в свою очередь предполагает высокую степень вероятности поступления грунтовых или поверхностных вод в рабочие водоносные горизонты минеральных вод.

Существует потенциальная опасность деградации месторождений минеральных вод. Степень вероятности такого исхода определяется совместным воздействием физико-химических процессов сорбции, диффузии, конвективного массопереноса, особенностями геолого-гидрогеологического строения гидrolитосферы, климатическими факторами и режимами эксплуатации каптажных сооружений. В зависимости от соотношения этих процессов может происходить либо самоочистка нисходящих потоков, либо заражение смежных водоносных горизонтов. Эти процессы характеризуются высокой инерционностью и очень растянуты во времени. Оценить характер и тенденции их развития возможно только на основе математического моделирования, охватывающего периоды упреждения в несколько десятков лет.

Приобретение КМВ статуса особо охраняемого эколого-курортного региона мало отразилось на улучшении экологической обстановки. Более того, рыночные отношения сняли многие запреты, ранее не подлежавшие даже обсуждению. За последние 5 лет только в Кисловодске появилось 8 новых заправок станций, расположенных в зоне горно-санитарного округа II пояса. Если раньше речь шла в основном только о коммунально-бытовом загрязнении грунтовых вод, являющихся основным источником загрязнения водоносных горизонтов минеральных вод, то, очевидно, в перспективе следует ожидать расширения перечня загрязняющих веществ.

Основной и актуальной проблемой для региона КМВ является сохранение основных базовых элементов курортной индустрии, в первую очередь, минеральных источников.

Целью исследований является улучшение состояния верхней гидродинамической зоны гидrolитосферы региона КМВ, обоснование экологически безопасных режимов эксплуатации водоисточников и водоносных горизонтов, системы управления и составление долгосрочных (до 100 лет) прогнозов развития процессов в гидrolитосфере региона.

Задачи исследований включали обоснование целевой функции; построение (гидравлической, математической) модели объекта; обоснование системы оперативного управления гидродинамическими и гидрогеохимическими режимами эксплуатации рабочих горизонтов; построение прогнозных экологических и гидрогеологических карт по рабочим горизонтам.

Эффективность работы водоносной системы определяется большим количеством различных геологических, технических и экономических факторов. Их совместный учет требует построения целого комплекса геолого-математических моделей, на которых можно выполнить прогнозирование ситуации и обосновать оптимальный режим дальнейшей эксплуатации.

Общая оптимизационная задача может быть сформулирована следующим образом [3, 7]. 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:

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

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.

Формирование целевой функции выполняется на основе эколого-гидрогеологического районирования. В процессе районирования дается оценка степени экологической защищенности водоносных горизонтов, изучения уровня техногенного воздействия на состояние гидrolитосферы, обоснования предельных режимов эксплуатации, пространственного

отображения основных факторов, влияющих на экологическое состояние объекта, и обоснования доминирующего. На схеме районирования отражаются [3]: особенности техногенной нагрузки; характер гидравлической связи подземных и поверхностных вод; пространственные закономерности и структура подземного потока; гидрогеохимические условия объекта.

Районирование позволяет установить предельный уровень безопасной нагрузки на различные зоны объекта, сформулировать систему ограничений.

Техногенная нагрузка на геологическую среду в сочетании с природно-экологическими факторами обуславливает общую направленность в формировании нарушенного режима гидrolитосферы. Оценка техногенной нагрузки предполагает определение ее качественных и количественных критериев. Характер типов хозяйственной деятельности определяет и характер технологической нагрузки. Здесь могут выделяться, в зависимости от экономической ориентации района, промышленное производство, объекты стройиндустрии, предприятия пищевой промышленности, сельскохозяйственные объекты, коммунально-бытовое хозяйство.

Характер гидравлической связи подземных и поверхностных вод определяется строением и мощностью зоны аэрации. Зона аэрации менее 5 м обуславливает гидравлический режим связи подземных и поверхностных вод. Взаимодействие характеризуется сезонной направленностью, чуткой реакцией на температурный режим и интенсивность поступления влаги с поверхности конвективным механизмом переноса. При мощности зоны аэрации 5–10 м режим связи определяется как капиллярно-гидравлический. Преимущественной формой движения влаги является пленочно-капиллярный и капиллярно-гравитационный влагоперенос, конвективный и дисперсионный массоперенос. В третьей зоне, зоне инфильтрационной связи, движение влаги мало зависит от количества воды, поступающей в данное время на поверхность земли. Движение воды здесь, как правило, пленочное, капиллярно-пленочное и капельно-гравитационное. Форма массопереноса — сложная. Чем больше мощность зоны аэрации, тем выше сорбционная емкость пород, больше длительность конвективного переноса загрязняющих веществ, тем лучше защищенность ПВ от загрязнения с поверхности.

Пространственные закономерности и структура подземного потока предусматривает выделение 2 типов структур: радиальную и плоскопараллельную. Плоскопараллельный тип ха-

рактеризуется равномерным чередованием гидроизогипс прямолинейной формы. Радиальный подразделяется на радиально-сходящийся и радиально-расходящийся. Они характеризуются своеобразными изменениями направления движения на локальных участках, что приводит к формированию подземных водоразделов и ложбин подземного стока. Такие структуры названы гидродинамическими ловушками [3], под которыми понимаются такие участки потока, где наблюдаются гидродинамические условия, весьма благоприятные для проникновения, выноса с высокой скоростью и аккумуляции различных химических компонентов, в том числе загрязняющих веществ. Местоположение гидродинамических ловушек устанавливается по форме гидроизогипс: разветвление потока; смена латеральной скорости фильтрации на вертикальную или наоборот; резкое изменение гидравлического градиента потока.

Анализ карты гидроизогипс позволяет установить наиболее опасные участки накопления и пути транспортировки загрязняющих веществ. Гидрогеохимические условия представлены в виде карт (схем), на которых изображаются пространственные закономерности распределения минерального состава или наиболее значимых компонентов ПВ. Такие карты строятся отдельно по каждому горизонту и дают возможность оценить особенности гидрогеохимических условий и условий формирования химического состава ПВ.

В итоге, в результате районирования выдаются рекомендации по безопасным нагрузкам на водозаборные сооружения, обеспечивающие выполнение заданных условий.

Изменение природной обстановки в ПВ обусловлено воздействием на водоносную систему откачкой или нагнетанием, и для водозаборных сооружений в большинстве случаев речь идет об определении предельно допустимых понижений уровня, обеспечивающих сохранность кондиционного состава ПВ и санитарно-гигиенической обстановки в пределах всего срока эксплуатации водозабора.

Математическая постановка задачи может быть представлена следующим образом:

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

где: Q_i — дебит скважины (водозабора); $Q_{\text{сум}}$ — заявленный суммарный водоотбор; C_{min} , C_{max} — минимальное и максимально допустимые

мое значения минерализации ПВ; C_c — среднее значение минерализации смеси общего потока; $H_i(t)$ — положение динамического уровня на момент времени t ; k_0 — коэффициент пропорциональности; H_{id} — предельно возможное понижение уровня в рассматриваемом каптаже. Все цифры предельных режимов эксплуатации обосновываются специальными гидрогеологическими исследованиями и эколого-гидрогеологическим районированием объекта.

При $F = 0$:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{\text{сум}} \\ k_0 = \frac{\sum_{i=1}^n H_i(t)}{H_{id}} \\ 0 < Q_i \leq Q_{\text{max}} \\ C_{\text{min}} \leq C_c \leq C_{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

Гидравлические модели

При эксплуатации водоносных систем положение динамического уровня в i -том каптажном сооружении в общем случае представляет собой срезку уровня от работы рассматриваемого водозабора и взаимодействующих с ним. Если используются методы гидравлики, то положение динамического уровня на текущий момент ($H_i(t)$) в i -том водозаборном сооружении может быть определено по формуле:

$$H_i(t) = H_{0i} + Q_i \bar{C}_i + \sum_{j=1}^n Q_j \bar{C}_j + S_v \quad (4)$$

где H_{0i} , \bar{C}_i — начальное (статическое) положение уровня в i -ом водозаборе и удельное понижение; Q_j , \bar{C}_j — дебит j -ого взаимодействующего водозабора (скважины) с i -тым и коэффициент гидравлического взаимодействия водозаборов (скважин); S_v — временная срезка уровня на конец рассматриваемого периода t .

С учетом (3) систему (4) можно переписать в следующем виде (без учета последнего члена в правой части):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{\text{сум}} \\ k_0 = \frac{Q_{\text{сум}} + \sum \frac{H_i(t) + S_v}{\bar{C}_i}}{\sum \frac{H_{id}}{\bar{C}_i}} \\ 0 < Q_i \leq Q_{\text{max}} \\ C_{\text{min}} \leq C_c \leq C_{\text{max}} \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) дает возможность достаточно просто найти необходимое решение. Здесь используется итерационная процедура отыскания необходимого распределения дебита между водозаборными сооружениями. Вначале

определяется коэффициент k_0 . Далее вычисляются нагрузки на скважины:

$$Q_i = \frac{k_0 \cdot H_{id} - H_i(t) - S_v}{\bar{C}_i} \quad (6)$$

Решение (6) дает предварительное распределение нагрузок. Затем вычисляются срезки уровня от влияния соседних каптажей и производится корректировка $H_i(t)$, т.е. учитывается последний член в правой части (4). Полученные новые уровни $H_i(t)$ принимаются за исходные, и итерационная процедура повторяется вновь. Счет заканчивается после достижения необходимой точности.

Математические модели

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. В общем случае система исходных дифференциальных уравнений, описывающих пространственный процесс фильтрации и массопереноса, при некоторых допущениях может быть представлена следующим образом [1, 2, 5]:

$$\begin{cases} \eta^* \frac{\partial H}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \\ \eta_a \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \\ - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - V_z \frac{\partial C}{\partial z} - W_R \end{cases} \quad (7)$$

где η^* — упругость пласта; k_x , k_y , k_z — коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам, H — функция напора; n_a — активная пористость; D_x , D_y , D_z — коэффициент гидродинамической дисперсии; C — концентрация исследуемого компонента; V_x , V_y , V_z — компоненты скорости фильтрации по соответствующим координатам; W_R — параметр, характеризующий интенсивность внутрислоевых обменных процессов.

Уравнения дополняются условиями однозначности, представляющими собой совокупность начальных и граничных условий.

Решение системы (7) затруднительно из-за недостаточной параметрической обеспеченности модели при существующей методической базе экспериментальных исследований, и в практических задачах значительно чаще рассматриваются плоско-пространственные задачи, описываемые дифференциальными уравнениями вида:

$$\left\{ \begin{aligned} \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} &= km_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + km_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \\ &+ b_n (H_n - H) + b_k (H_k - H) \\ n_3 \frac{\partial C}{\partial t} &= D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - \\ &- V_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{V_{zn}(C - C_n)}{m} - \frac{V_{zk}(C - C_k)}{m} \end{aligned} \right. \quad (8),$$

где μ^* – водоотдача пласта; β – коэффициент распределения при сорбции; b_k, b_n – параметр перетекания относительно водоупорного пласта, залегающего в кровле и подошве; H_k, H_n – напоры в смежных водоносных горизонтах, кровле и подошве; km – водопроводимость пласта; m – мощность водоносного горизонта; n_3 – эффективная пористость ($n_3 = n_a(1 + \beta)/\beta$); V_{zn}, V_{zk} – скорости перетекания воды через кровлю и подошву пласта; C_n, C_k – концентрация поровых растворов в подошве и кровле пласта.

Как следует из (8) для решения задачи массопереноса требуется знание скорости фильтрации. Решение ее осуществляется в два этапа: на первом решается задача геофильтрации, в результате определяются скорости фильтрации и расходы потоков между центрами модельных блоков, на втором – собственно задача массопереноса.

Решение выполняется численными методами. В настоящее время известны явные, явно- неявные, неявные методы, позволяющие учитывать процессы перетекания и самые различные граничные условия. Они реализованы в многочисленных программах (Топаз, *Plast, Mod Tech, МИФ-3* и др.), и с позиций математики решение дифференциальных уравнений вида (7), (8) особой сложности не представляет.

Более сложной задачей является параметрическое обеспечение модели, поскольку геологические объекты характеризуются высокой степенью неоднородности и изменчивости коллекторских свойств. Конечно, при формировании исходной модели предварительная информация о фильтрационных свойствах среды имеется. Она определяется на основе полевых опытно-фильтрационных исследований, которые проводятся в процессе геологического изучения объекта, однако это точечные оценки, которые не всегда совпадают со средними значениями, характеризующими процессы геофильтрации. В этой связи очень важно располагать методикой верификации, позволяющей по данным эпигноза производить корректировку параметров модели. Имеющуюся информацию о режимах эксплуатации объекта за прошедшие периоды воспроизводят на мо-

дели и с помощью специальных приемов вводят корректировку параметров, обеспечивая максимальную сходимость фактических и модельных данных.

Постановка задачи следующая. Имеется ряд наблюдений за динамикой уровня в эксплуатационных скважинах и скважинах наблюдательной сети, режим эксплуатации объекта, особенности его геолого-гидрогеологического строения. Необходимо уточнить параметры водоносного горизонта: водопроводимость, водоотдачу, коэффициент перетекания, граничные условия. Рассматривается плоско-пространственная задача. Фильтрационная среда принимается кусочно-однородной.

Задача решается на модели в понижениях уровня, путем прогонки ряда вариантов с различными значениями цифровых параметров водоносных горизонтов, вводимых по определенному алгоритму [8], иными словами, используется методика подбора. Такой подход вполне оправдан, поскольку простые однотипные алгоритмы очень просто реализуются на вычислительной технике.

В качестве критерия адекватности использовалось среднеквадратичное отклонение модельных данных от фактических, вычисляемое по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (S_{jM} - S_{jФ})^2}{n}} \quad (9),$$

где: $S_{jM}, S_{jФ}$ – модельное и фактическое понижение уровня в рассматриваемой наблюдательной скважине (блоке); n – количество точек наблюдения в выбранном диапазоне временного интервала.

Границы смены фильтрационных свойств выделяются по геолого-тектоническим признакам и контролируются наблюдательной сетью. Каждый элемент среды должен быть охарактеризован режимом хотя бы одной наблюдательной скважины. Очень полезными здесь могут оказаться данные сейсморазведки, тогда выделение блоков будет более обоснованным.

Решения задачи начинается по схеме снизу-вверх. При этом принимается допущение, что подпитка из недр в самый нижний изучаемый горизонт не происходит или же ею можно пренебречь. Процедура решения задачи осуществляется в несколько этапов по следующей схеме.

1. На первом этапе в модель вводятся гидродинамические параметры смежных водоносных горизонтов, полученные по результатам опытно-фильтрационных работ. Для самого нижнего водоносного горизонта задается не-

который диапазон значений параметров, параметры остальных горизонтов (при изучении рассматриваемого) не меняются.

2. На модели воспроизводится фактический режим эксплуатации, и для каждого из выбранного набора параметров в интересующем диапазоне временного интервала определяют понижение уровня в блоках, моделирующих наблюдательные скважины (для нижнего водоносного горизонта). Далее, сопоставляя модельные и фактические понижения на одноименные моменты времени, рассчитывается среднеквадратическое расхождение (δ) модельных и фактических данных.

3. Если полученные решения изобразить графически, то для каждого горизонта можно построить график распределения (δ) в зависимости от $km \div \mu^*$.

4. Определив параметры самого нижнего горизонта, их вводят в модель и приступают к аналогичной процедуре определения параметров водоносного горизонта, располагающегося выше по разрезу.

5. Далее производится корректировка параметра перетекания и пьезометрической поверхности ПВ.

Принимая естественный режим фильтрации как стационарный, переписем первое уравнение в системе (8) в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & -W_k - W_n = -\Delta W = \\
 & = \left(\frac{km_i(H_{i-1,j} - H_{j,i}) - km_{i+1}(H_{i,j} - H_{i+1,j})}{\Delta x^2} \right) + (10), \\
 & + \left(\frac{km_j(H_{i,j-1} - H_{i,j}) - km_{j+1}(P_{i,j} - H_{i,j+1})}{\Delta y^2} \right)
 \end{aligned}$$

где W_k, W_n — питание горизонта в кровле и подошве.

Зная начальное распределение естественных напоров в пласте и водопроницаемость разреза, можно определить суммарную вертикальную величину подпитки горизонта (ΔW), если согласиться с допущением, что на нижней границе водонапорной системы имеет место граничное условие второго рода ($W_n = 0$). Это допущение вполне приемлемо, поскольку с увеличением глубины фильтрационные свойства разреза снижаются довольно существенно. Тогда, рассматривая задачу последовательно снизу вверх, можно установить перетоки для каждого горизонта и оценить степень гидравлического взаимодействия пластов (параметр перетекания):

$$b_k = \frac{W_k}{(H - H_k)} \quad (11),$$

Если, выполнив подобным образом расчеты для всех блоков и водоносных горизонтов

и вычислив параметры перетекания при принятых значениях водопроницаемости, ввести их в модель вместе со статическими напорами, то полученное решение будет отвечать стационарной модели или начальным условиям во второй постановке.

Если же допущение $W_n = 0$ не принимается, то для решения указанной задачи необходима дополнительная информация, которая может быть получена, например, из кустовых опытно-фильтрационных исследований.

По данным кустовой откачки из рассматриваемого горизонта определяются водопроницаемость (km) и комплексный параметр (B), в результате чего получается система из двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} B = \sqrt{\frac{km}{b_n + b_k}} \\ \Delta W_k = W_n - W_k = b_n(H_n - H) + b_k(H - H_k) \end{cases} \quad (12),$$

откуда достаточно просто найти неизвестные b_n, b_k .

В этом случае последовательность вычислений значения не имеет, и можно проводить изучение разреза с любого водоносного горизонта. Однако, во-первых, потребуются информация о распределении напоров в подстилающем водоносном слое (H_n), во-вторых — параметры перетекания (b_n) можно определить только в некоторых ограниченных точках, соответствующих местам расположения гидрогеологических кустов. На остальной площади они могут быть получены только методом интерполяции, и для получения стационарной поверхности потребуется увязка пьезометрических напоров и параметров через соотношение b/km . Исходя из этих соображений, целесообразнее начинать изучение разреза с водоносных горизонтов, по которым имеется максимальный объем информации.

В качестве примера можно привести расчеты по Кисловодскому месторождению лечебных минеральных вод, краткая характеристика геолого-гидрогеологического строения которого понятна из **рис. 1**.

После определения емкостных и фильтрационных параметров по данным гидроизопьез по формуле (10) было рассчитано глубинное и инфильтрационное питание. Далее, по формуле (11) определен параметр перетекания между титонским и валанжинским горизонтами. Полученные параметры заложены в модель, произведено моделирование при нулевых нагрузках на скважины для $t = 3$ года. Если расчеты сделаны корректно, то положение каждой статической поверхности должно оставаться не-

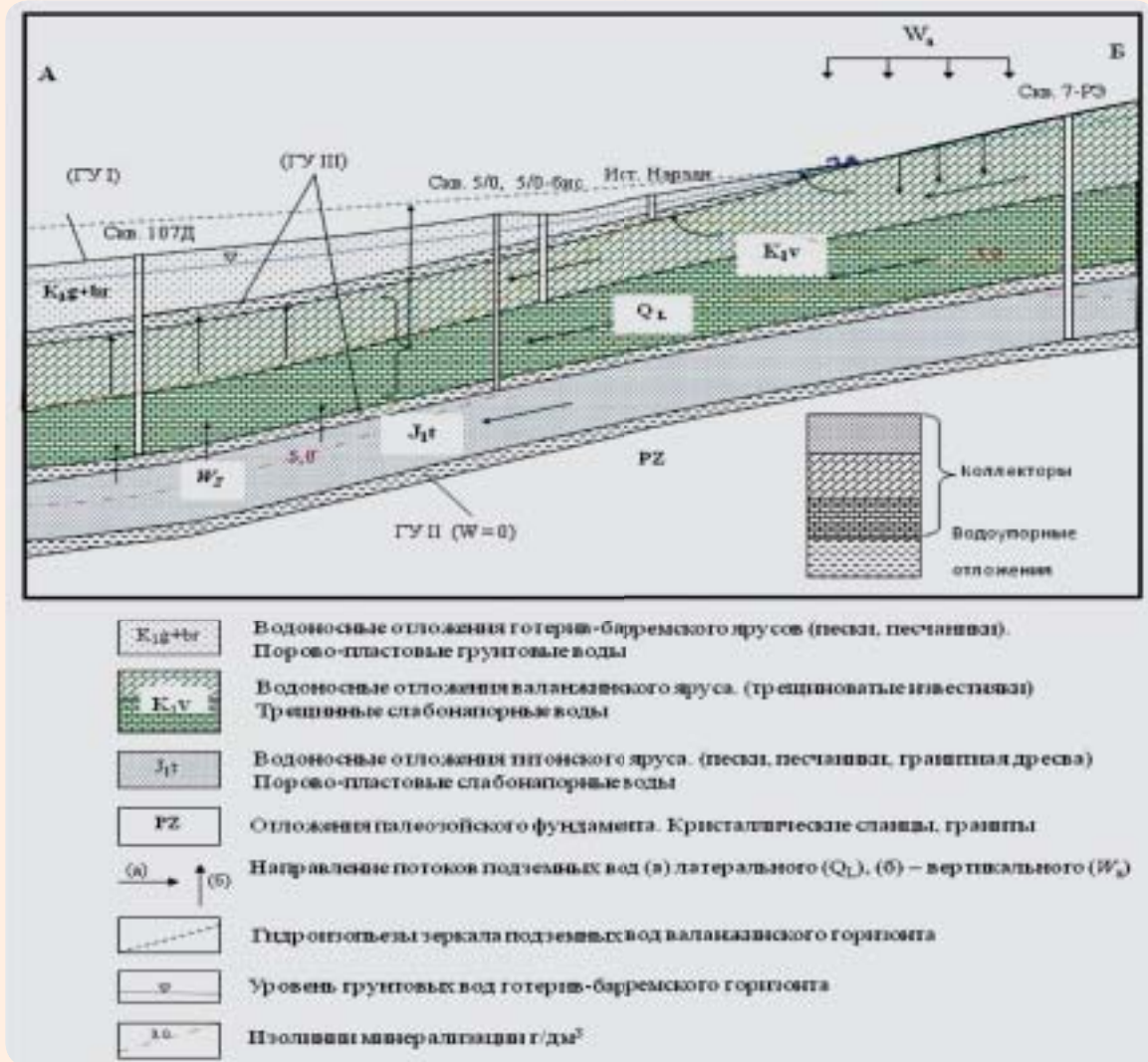


Рис. 1.

Геолого-гидрогеологический разрез по линии А-Б

хождения в фактических и модельных оценках в среднем составляют до 20%. Далее на модели по координатам задаются эксплуатационные скважины и режимы их эксплуатации. Производится моделирование нарушенного гидродинамического и гидрогеохимического режимов.

Формулы (5, 6) представляют собой сосредоточенный пропорциональный регулятор, используемый в системе управления совместно с гидравлической моделью. Применение математических моделей позволяет использовать более точные методы управления, например, с использованием распределенного высокоточного регулятора (РВР). Передаточная функция РВР для конкретных условий имеет вид [9]:

$$W(x, s) = 172577036 [-\nabla^2] + 0,20965 \frac{1}{p} + 140765,4 \left[\frac{0,000024}{1,000} - \frac{1}{1,00} \nabla^2 \right] \cdot p \quad (14),$$

где p – оператор Лапласа.

изменным. По результатам расчетов понижения уровней в горизонтах за 3 года не превышают 1 мм, что свидетельствует о корректности расчетов.

После корректировки гидродинамической модели осуществлялось моделирование миграционных процессов в условиях стационарного режима. Учитывая, что природные гидравлические градиенты весьма существенны, второе уравнение в системе (8) может быть представлено в следующем виде:

$$n_3 \frac{\partial C}{\partial t} = -V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{V_{zn}(C - C_n)}{m} - \frac{V_{zk}(C - C_k)}{m} \quad (13),$$

т.е. рассматривается только конвективный перенос. В уравнении (13) неизвестна величина эффективной пористости (n_3). Она также отыскивалась методом подбора. Расчетами установлено $n_3 = 0,3$.

На рис. 2 дано сопоставление фактических и модельных значений минерализации. Рас-

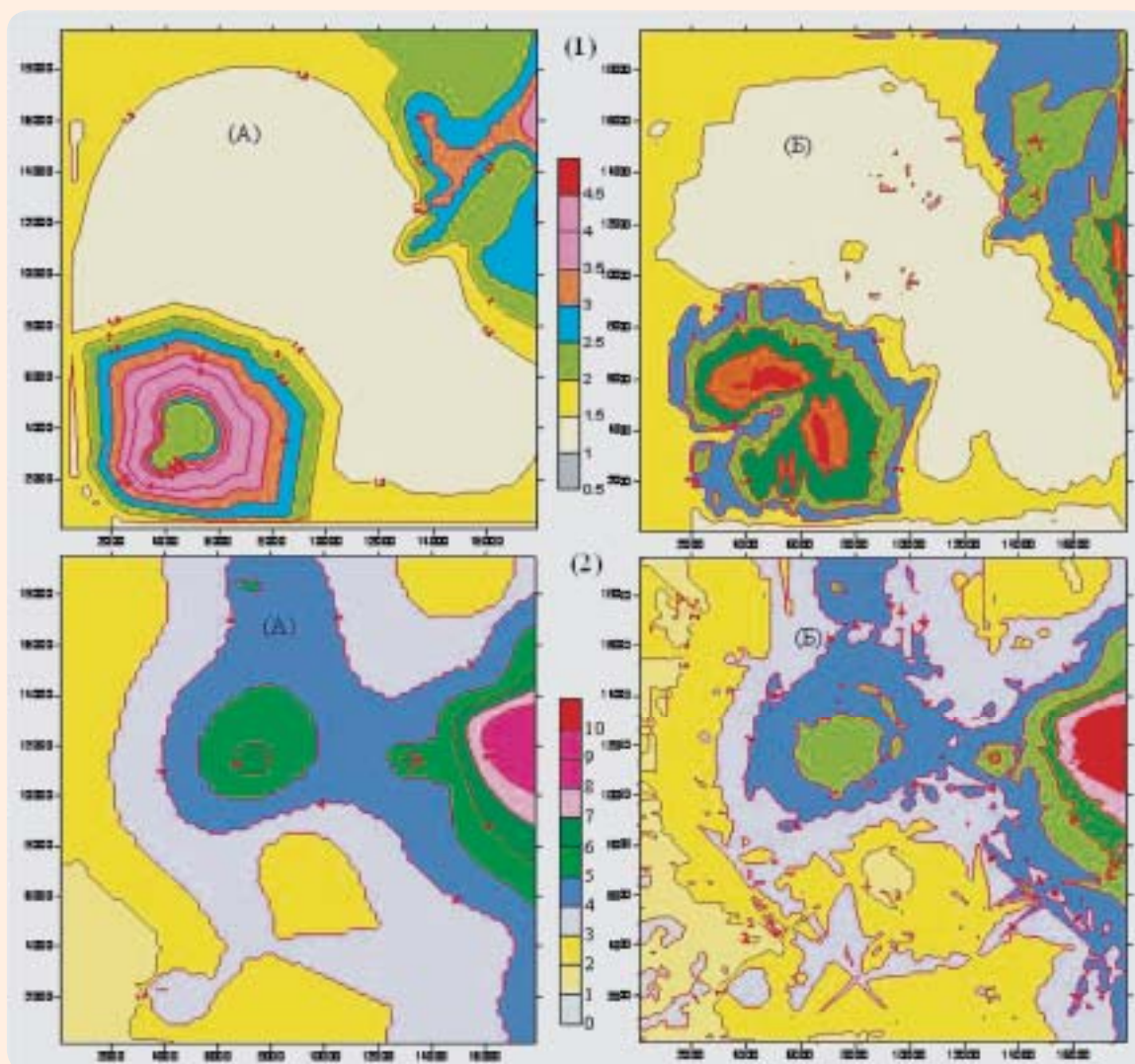


Рис. 2.

*Сопоставление минерализации подземных вод:
1 – валанжинский горизонт; 2 – титонский
горизонт; А – фактические; Б – модельные
($t = 3$ года)*

Вывод

Реализация методики позволяет создать экологически безопасную систему оперативного управления режимами эксплуатации минеральных вод. ❊

Литература

1. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М. 1973. 302 с.
2. Бочевер Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М. 1968. – 325 с.
3. Гавич И.К. Гидрогеодинамика. М. 1988. 349 с.
4. Гидрогеологические расчеты на ЭВМ / Под ред. Р.С. Штенгелова. М. 1994. 335 с.
5. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. М. 1969. 311 с.
6. Малков А.В. Определение гидродинамических параметров водоносных горизонтов в условиях перетекания // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 31–34.
7. Малков А.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидrolитосферными процессами. М. 2007. 252 с.
8. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. М. 2012. 473 с.
9. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск. 2002. 212 с.