

Решение обратных задач геофильтрации на математических моделях гидрогеологических объектов

В.В. Веселов, В.Ю. Паничкин, О.Л. Мирошниченко

Математическое моделирование как метод научного исследования используется в гидрогеологии начиная с конца 60-х годов. В последнее время оно переживает новый этап. В связи с интенсивным развитием компьютерной техники стали возможными хранение, обработка и анализ больших объемов данных. Разработаны программные средства, позволяющие решать системы уравнений большой размерности. Это сделало математическое моделирование ведущим методом гидрогеологических исследований.

Под термином «модель» обычно понимают любое отображение (воспроизведение) каким-либо способом реально существующей действительности для изучения свойственных ей объективных закономерностей. Для одного и того же объекта в зависимости от целей моделирования и типа решаемой задачи может быть построен ряд моделей. Система математических зависимостей, описывающих структуру или функционирование исследуемого объекта, называется математической моделью. В гидрогеологии математические модели применяются для имитации процессов геофильтрации в гидrolитосфере. Значительное распространение получили детерминированные модели, представляющие собой систему дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

Основное требование к модели – ее адекватность объекту. Разработка и обоснование математической модели на основании наблюдений, полученных в условиях функционирования объекта по его входным и выходным переменным, составляет задачу идентификации (калибровки). Обычно в процессе калибровки решаются обратные стационарные и нестационарные задачи с одновременным проведением факторно-диапазонной оценки параметров модели [5].

Обратными называют задачи восстановления неизвестных свойств объекта по известным. В процессе гидрогеологического моделирования выделяют задачи определения гидрогеологических параметров, граничных условий и математических уравнений, описывающих исследуемый объект. Как правило, такие задачи являются математически некорректными. Они могут иметь неединственное решение или не иметь его вообще. Может нарушаться условие непрерывной зависимости решения от входных данных, т.е. сколь угодно малым изменениям исходных данных могут отвечать произвольно большие, выходящие за допустимые пределы изменения решения [1].

Целесообразно обратные гидрогеологические задачи решать как оптимизационные. За критерий оптимальности принимается величина абсолютного или относительного расхождения натуральных и полученных в результате решения задачи значений динамических функций. Например, для гидродинамических задач – это отметки уровней, расходы или градиенты потока, для задач геомиграции – концентрация растворенных в воде веществ. Искомыми величинами, или параметрами управления для задач геофильтрации обычно являются водопроницаемость, коэффициенты фильтрации, гравитационной и упругой водоотдачи пласта, уровнепроницаемости и пьезопроводности, величина инфильтрационного питания и др. Достоверность полученных результатов оценивается по критериям гидрогеологического правдоподобия [4 – 6].

Необходимо отметить, что гидрогеологический объект часто имеет довольно сложную структуру и подвержен влиянию множества факторов как природных, так и техногенных. Кроме того, имитируемые процессы недоступны непосредственному наблюдению. Изученность моделируемого объекта, как правило, крайне неравномерна по площади. Свойства исследуемого объекта определяются лишь в отдельных точках, причем часто со значительными погрешностями. Закономерности их изменения в пространстве имеют достаточно сложный характер. Наблюдения за динамическими характеристиками обычно эпизодические, поэтому ведущая роль в проведении калибровки модели принадлежит эксперту. Правильность задания критериев и оценка полученных результатов в значительной мере зависят от его квалификации. Недостаток и неточность информации об объекте требуют привлечения косвенных данных о нем – результатов геофизических исследований, анализа литологического состава пород и т.д. [3].

Таким образом, в процессе калибровки эксперт использует большой объем разнородной информации об объекте моделирования, представленной в виде карт разного содержания и масштаба, разрезов, таблиц, текстовых описаний и т.д. Часто для решения эпигнозных задач требуется информация об объекте многолетней давности. Часть данных может быть утеряна. Кроме того, проведение полевых исследований и интерпретация результатов осуществляются различными организациями, что может привести к некоторой противоречивости данных. Анализ как прямой, так и косвенной информации об объекте требует больших затрат времени и труда. Для его эффективного проведения данные должны быть представлены в удобной для эксперта форме.

Обычно сведения, требующиеся для создания модели, представимы в графической форме или в виде таблиц. Для их хранения, автоматизации поиска, обработки и анализа создаются базы графических и семантических данных. Следует отметить, что они должны быть организованы с учетом требований к подготовке данных, предъявляемых системой моделирования.

В Институте гидрогеологии и гидрофизики МОН РК разработаны комплекс инструментальных средств, методика и технология автоматизированного формирования математических моделей гидрогеологических объектов и их калибровки, которые существенно снижают трудоемкость моделирования. Комплекс включает в себя геоинформационную систему (ГИС), реализованную на основе Map-Info 5.0; базу первичных гидрогеологических данных, созданную на FoxPro 6.0; систему математического моделирования GMS 3.1 (Groundwater modelling system) и ряд сервисных программ.

Сведения, представленные в графической форме, хранятся в ГИС. К ним относятся карты и разрезы, построенные по фактическим данным и результатам схематизации. Геоинформационная система применяется также для визуализации и пространственного анализа результатов моделирования.

Данные полевых наблюдений по скважинам (описание конструкции, разреза, результатов откачек, сведений по уровенному режиму подземных вод и их качеству), а также результаты схематизации моделируемой области содержатся в базе первичных гидрогеологических данных. Они представлены в символьной и числовой форме.

Программный комплекс GMS 3.1 позволяет имитировать процессы геофильтрации – движения подземных вод в зонах полного и неполного насыщения, переноса растворенных в воде веществ. Этот комплекс включает средства калибровки модели и визуализации результатов моделирования, инструменты для создания триангуляционной нерегулярной сети, конструирования трехмерных моделей стратиграфии и некоторые другие компоненты [8].

Разработанные сервисные программы обеспечивают обмен данными между основными компонентами комплекса. Они формируют наборы исходных данных, выбирают из баз графических и семантических данных результаты схематизации моделируемого гидрогеологического объекта и преобразуют их в форматы GMS 3.1. В процессе калибровки модели используются наблюдательные (контрольные) точки. В них содержатся достоверные значения динамических функций в заданные моменты времени и диапазоны их возможных изменений при вариации подбираемых параметров модели. Сервисные программы автоматизируют создание файлов наблюдательных точек.

В процессе геоинформационно-математического моделирования выделяются три основных этапа: анализ и схематизация гидрогеологических условий; формирование и идентификация математической модели; использование модели для решения тех или иных содержательных задач (рис.1).

Анализ и схематизация включают (рис.2):

Составление схемы районирования. На этом этапе осуществляются сбор исходной информации, ее оценка, подготовка и ввод в базу имеющихся семантических и графических данных. Определяются примерные границы моделируемой территории и выполняется ее районирование.

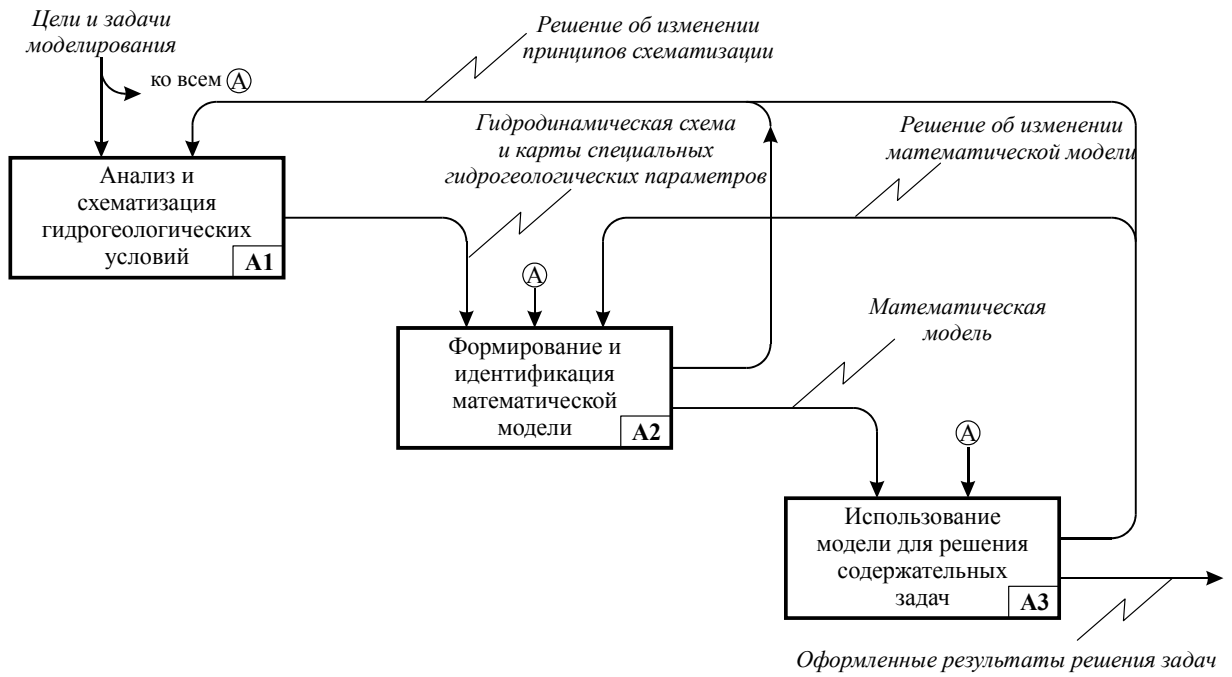


Рис. 1. Схема функциональной структуры системы геоинформационно-математического моделирования гидрогеологических объектов

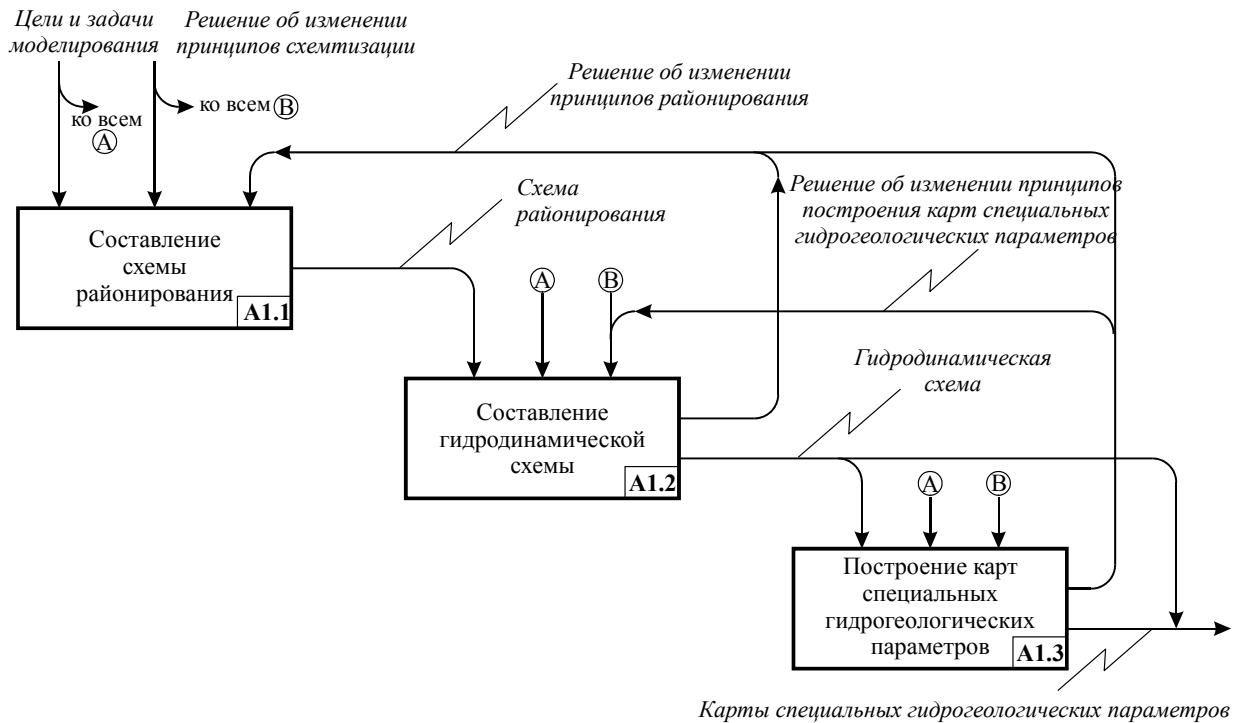


Рис. 2. A1. Анализ и схематизация гидрогеологических условий

Схема районирования формируется средствами ГИС с использованием уже введенных картографических материалов. Выбирается и обосновывается математическая модель процесса.

Составление гидродинамической схемы (в плане и разрезе). На основе сведений, содержащихся в базах графических и семантических данных, анализируются гидрогеологические условия исследуемой территории. Выполняется их схематизация, в процессе которой учитываются только факторы, существенно влияющие на имитируемые процессы.

Построение карт специальных гидрогеологических параметров в соответствии с гидродинамической схемой. Для этого выделяются типовые структурные элементы (зоны), в пределах которых значения фильтрационных и других параметров считаются постоянными. С каждой зоной связываются значения этих параметров, а также задаются интервалы, в которых они могут изменяться. Карты параметров строятся для каждого выделенного слоя.

На этапе формирования и идентификации математической модели выполняются следующие процессы (рис.3):

Формирование наборов исходных данных. С помощью разработанной программы из баз графических и семантических данных производится выборка сведений, отражающих результаты схематизации моделируемого объекта и преобразование их в форматы GMS 3.1.

Создание концептуальной схемы, которая является отображением гидродинамической схемы средствами GMS 3.1. Границы моделируемой области, естественные и техногенные объекты, оказывающие существенное влияние на моделируемый процесс, отображаются типовым набором объектов, используемых системой моделирования. Карты параметров конвертируются в форматы GMS 3.1. Для последующей оценки качества калибровки модели с помощью разработанной сервисной программы на схему наносятся наблюдательные точки.

Аппроксимация в пространстве и во времени. На этом этапе осуществляется генерация прямоугольной сети в плане. Аппроксимация в разрезе выполняется автоматически на основе сведений о геометрии слоев, представленных в концептуальной схеме. Для аппроксимации по времени задаются количество и длина так называемых стрессовых периодов [8], каждый из которых разбивается на фиксированное число шагов.

Генерация фильтрационной схемы. Концептуальная схема автоматически отображается на сформированную сеть. С помощью специальных программных средств осуществляются формальная проверка исходных данных и их редактирование в случае обнаружения ошибок.

Калибровка модели и оценка полученных результатов. Она проводится для доказательства адекватности модели природным условиям. Результаты калибровки в значительной мере зависят от эксперта.

При калибровке выполняется подбор параметров модели. Чаще всего для гидродинамических задач в качестве таких параметров выступают площадное питание, коэффициенты фильтрации, упругой и гравитационной водоотдачи и т.д. Для автоматизации их подбора используется программа PEST, входящая в состав системы моделирования GMS 3.1. В ее основе лежат методы оптимального управления [2, 7].

Процесс калибровки созданной математической модели осуществляется следующим образом (рис.4):

Задаются контрольные точки. Из файла наблюдательных точек считываются координаты контрольных точек и значения заданных в них динамических функций, а также допустимые интервалы их возможных изменений.

Задаются начальные (предполагаемые) значения искомых параметров. Необходимо отметить, что чем ближе предварительное приближение к результату, тем выше вероятность его получения.

Задаются диапазоны изменения значений всех искомых параметров для зон, выделенных на этапе создания концептуальной модели. Также отмечаются зоны, для которых параметры не будут варьировать в процессе моделирования.

Расчет параметров и решение прямой задачи. Запускается модуль PEST, результатом работы которого является распределение значений искомых параметров в пределах моделируемой области. Решается прямая задача с рассчитанными значениями параметров. Для визуализации результатов решения обратной задачи используются специальные средства. С их помощью можно проконтролировать совпадение динамических функций по отдельным точкам, а также для всей модели.

Оценка качества решения производится экспертом. При неудовлетворительном результате могут корректироваться диапазоны изменения параметров, конфигурация зон задания параметров, начальное распределение искомых параметров, значения параметров, которые считаются известными и неизменными в процессе решения данной задачи, координаты контрольных точек и значения в них динамических функций.

Повторяется расчет параметров с помощью модуля PEST, решение прямой задачи и анализ результатов. Процесс повторяется до получения удовлетворительных с точки зрения эксперта результатов. Если описанным способом невозможно получить приемлемые значения параметров, принимается решение об изменении сеточной аппроксимация моделируемой области, вносятся изменения в концептуальную модель, в управляющие параметры, принципы схематизации гидрогеологических условий.

Разработанная методика была успешно апробирована в процессе моделирования гидрогеологических условий северной части Павлодарского промышленного района для прогнозирования распространения ареола ртутиного загрязнения подземных вод. Поступление ртути в подземные воды произошло в результате аварийных утечек в цехе по производству каустической соды Павлодарского химического завода. Подробное описание модели и полученных результатов приведено в статье В. В. Веселова, В. Ю. Паничкина «Моделирование гидрогеологических процессов в экологи-

Гидродинамическая схема и карты специальных гидрогеологических параметров

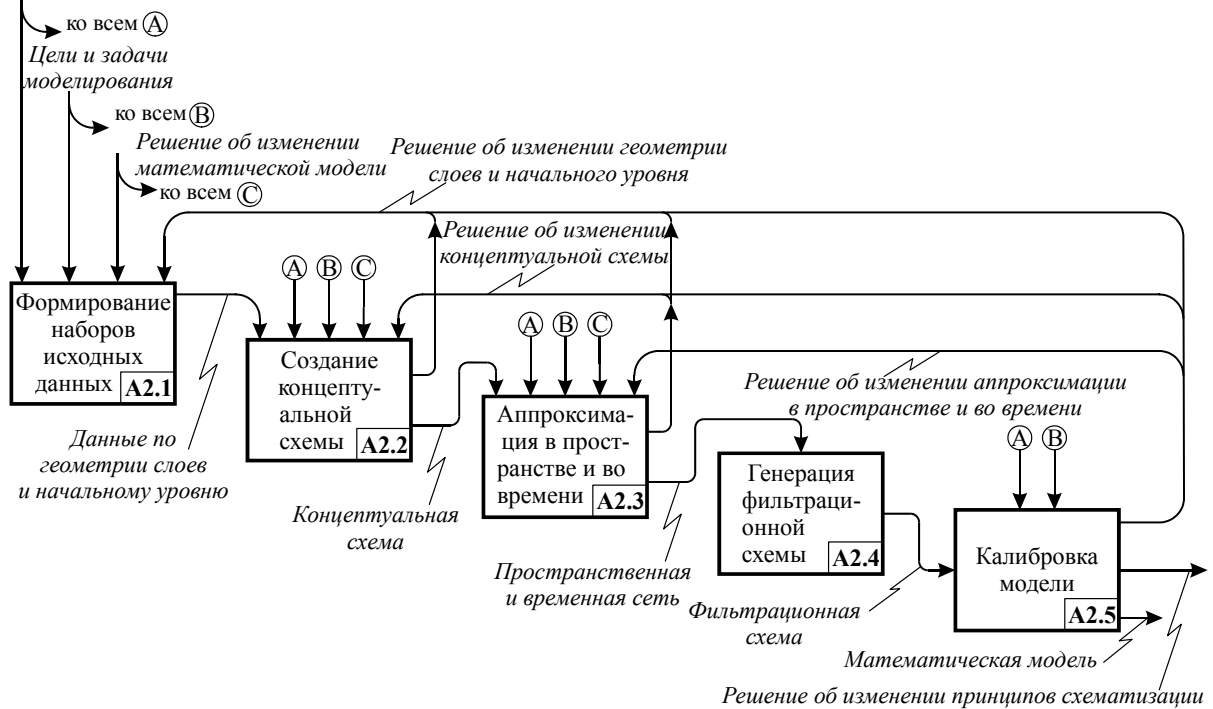


Рис. 3. A2. Формирование и идентификация математической модели

Гидродинамическая схема и карты специальных гидрогеологических параметров

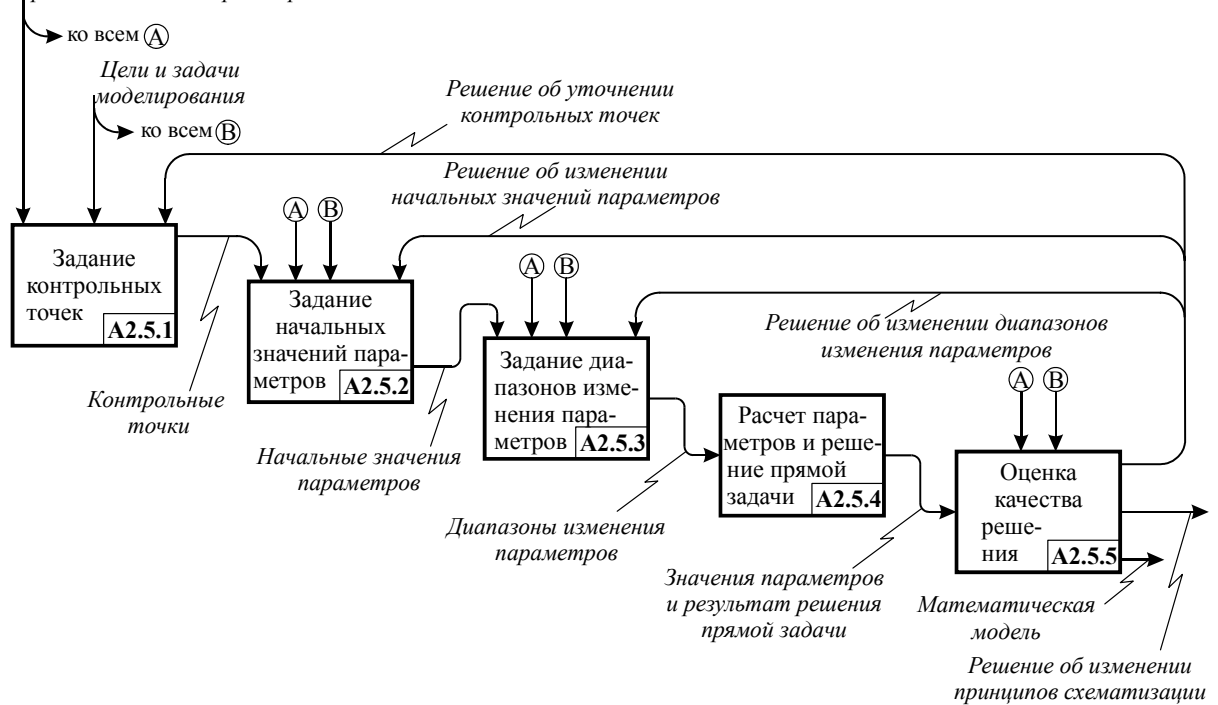


Рис. 4. A2.5. Калибровка модели

чески нарушенных регионах Казахстана», опубликованной в настоящем сборнике.

В заключение необходимо отметить, что разработанные методика и технология создания моделей гидрогеологических объектов и их калибровки на основе экспертного подхода и ГИС-технологий позволяют значительно сократить затраты труда и времени, а также повысить точность экспертных оценок и, как следствие, достоверность получаемых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.
2. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979. 349 с.
3. Веселов В.В., Вострокнутов Е.П. Экспертный подход к решению обратных задач для математических моделей природных объектов и процессов // Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан, 1993, №3. С.40-44
4. Гавич И.К. Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988. 349 с.
5. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1980. 358 с.
6. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
7. Doherty J., Brebber L., Whyte P. PEST. Model-Independent Parameter Estimation. Groundwater modeling system 3.1 documentation. USA. 2000.
8. Groundwater modeling system. Version 3.1. Tutorial manual. Environmental Modeling Research Laboratory of Brigham Young University. USA. 2000.