

9. Alverson B., Froese E., Kaplan L., Roweth D. Cray Inc. Cray XC Series Network. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.cray.com>.

10. Степаненко С. А. Оценки ускорения вычислений гибридными системами // V Международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления РАСО 2010»: Сб. докладов, Москва. 26–28 октября 2010 г. М.: Учреждение Российской академии наук. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2011. С. 61–71.

11. Infiniband Roadmap. [Electronic resource]. Mode of access: http://www.infinibandta.org/content/pages.php?pg=technology_overview.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ЧИСЛЕННЫХ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ И ГЕОМИГРАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ

И. Л. Хархордин¹, И. В. Горев², В. В. Горев²

¹ОАО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ», г. Москва,

²Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

На протяжении последних двух десятилетий в практике гидрогеологических исследований все большую роль начинает играть численное моделирование [1]+. Так, если в 80-х годах прошлого века разработкой численных моделей гидрогеологических процессов занимались всего несколько научных организаций, то сейчас численное моделирование используется во многих проектных институтах, на горно-добывающих предприятиях и в геолого-разведочных и изыскательских организациях. Произошел быстрый рост рынка программного обеспечения в соответствующей области. Также в указанный период продолжался экспоненциальный рост производительности вычислительной техники. Существенные изменения произошли и в требованиях к программному обеспечению. Они коснулись как интерфейса пользователя, так и вычислительных возможностей программ.

В плане интерфейса пользователя произошла смена нескольких поколений программ. До последнего времени графический интерфейс пользователя строился по принципу Препроцессор-Вычислитель-Постпроцессор. Единственной задачей Препроцессора была подготовка в графическом режиме файлов исходных данных в графическом режиме, а Постпроцессора – экстракция и визуализация результатов счета. Программные комплексы для численного моделирования были, как правило, лишены инструментов для работы с первичной гидрогеологической информацией. Это предполагает, что информация поступает к расчетчикам в уже подготовленном для создания модели формате. Такая структура программ удобна, когда расчеты выполняет сторонняя организация или специальный отдел. Тем не менее, такая организация программ затрудняет их использование для выполнения оперативных расчетов, необходимых, например, при анализе данных мониторинга или при возникновении аварийных ситуаций на горных предприятиях. Перспективным направлением дальнейшего развития программного обеспечения для гидрогеологических расчетов является разработка комплексных систем, организующих не только выполнение численных расчетов, но и работу с первичной информацией.

С точки зрения вычислительных возможностей, важным требованием к гидрогеологическим программам является возможность учета взаимодействия гидрогеологической системы с гидрогеологическими объектами различных типов. Под **гидрогеологическими объектами** далее мы будем понимать природные тела или инженерные сооружения, оказывающие влияние на формирование

водного баланса, а также тепловых и массовых потоков, в пределах расчетной области, но не являющиеся при этом ее частью. Сопряжение гидрогеологических объектов с расчетной сеточной областью реализуется через задание на них внутренних граничных условий.

На протяжении последних нескольких лет разрабатывался пакет прикладных программ NIMFA для моделирования различных гидрогеологических процессов. NIMFA позволяет решать задачи фильтрации подземных вод и переноса загрязняющих веществ в трехмерной постановке на неравномерных многофрагментных сетках с использованием методов конечных разностей [2].

Задачи фильтрации и теплопереноса в подземной гидросфере сводятся к решению системы дифференциальных и алгебраических уравнений. Рассмотрим некоторый произвольный объем (V), ограниченный поверхностью (S) в пределах гидрогеологической системы. Для этого объема мы можем записать следующее балансовое соотношение:

$$\iint_S \vec{j} \vec{n} dS = \iiint_V q dV, \quad (1)$$

где \vec{n} – единичный вектор, направленный по нормали к поверхности, \vec{j} – плотность потока воды, растворенного компонента или энергии, q – плотность источников в пределах выделенного объема, которая складывается из двух составляющих: внутренней, связанной с процессами протекающими внутри моделируемой гидрогеологической системы (упругой водоотдачей, теплообменом между раствором и породой, радиоактивным распадом, химическими реакциями и т. д.), и внешней, обусловленной действием сторонних источников/стоков (инфильтрацией, взаимодействием с поверхностным стоком, скважинами, родниковой разгрузкой и другими гидрогеологическими объектами).

Таким образом, при построении разностной схемы балансовое уравнение для внутренней ячейки расчетной области будет иметь вид:

$$\sum_i F_i + \sum_j q_j^{\text{int}} + \sum_k q_k^{\text{ext}} = \frac{\Delta M}{\Delta t},$$

где F_i – потоки через грани ячейки, q_j^{int} – интенсивность внутренних источников, q_k^{ext} – интенсивность внешних источников, связанных с взаимодействием расчетной области с гидрогеологическими объектами.

Наиболее часто встречающимися в практических задачах гидрогеологическими объектами являются (выделены ГО, реализованные в пакете НИМФА):

- **реки;**
- озера (водохранилища);
- родники (источники);
- **дрены;**
- земная поверхность;
- болота;
- **инфильтрация;**
- зона аэрации;
- **скважины;**
- подземные горные выработки (шахты, штольни);
- **открытые горные выработки (карьеры).**

При переходе с традиционного программного обеспечения, предназначенного для решения гидрогеологических задач, к использованию суперкомпьютеров произошли существенные изменения в процессе подготовки исходных данных для расчета. В традиционном подходе подготовка данных начиналась с построения сеточной области, а данные по параметрам среды и внешним источникам вводились в каждую ячейку расчетной области. Общая схема построения и решения задачи имеет вид: препроцессор-решатель-постпроцессор. При использовании супервычислений контролировать значения параметров в каждой ячейки становится невозможным, а сама сеточная область создается только при запуске модуля расчета начальных данных (РНД). Схема решения зада-

чи имеет вид: препроцессор-РНД-решатель-постпроцессор. Изменение подхода к подготовке данных повлекли необходимость изменения их структуры и подключения дополнительных опций.

Подготовка для численного моделирования гидрогеологических задач имеет ряд особенностей, обусловленных, с одной стороны, неточностью гидрогеологической информации о высотной привязке объектов и геометрии расчетной области, а, с другой, погрешностями интерполяции при построении границ раздела пластов и дневной поверхности. В связи с этим постоянно возникают ситуации, когда оказывается необходимым либо «подстраивать» геометрию расчетной области под гидрогеологический объект для корректного его представления на модели, либо корректировать высотную привязку объекта в соответствии с геометрией моделируемой области.

Решение данной задачи осуществляется в модуле расчета исходных данных. Для связи объектов с пластовой системой в метаязыке для описания задачи введен ряд новых ключевых слов и соответствующих им параметров. Для характеристики способа связи объекта с пластами используется следующее ключевое слово:

способ_связи_с_пластом ЗНАЧЕНИЕ

Параметр, ассоциированный с данным ключевым словом, может принимать следующие значения.

WHOLE_THICKNESS – свойства объекта равномерно распределяются по всей мощности пласта независимо от числа расчетных ячеек в вертикальном разрезе. Пример использования данного ключевого слова будет приведен в следующем разделе.

FIXED_THICKNESS_TOP – свойства объекта распространяются на интервал фиксированной мощности, отсчитываемый от кровли заданного пласта.

FIXED_THICKNESS_BOT – объект привязывается к подошве пласта.

FIXED_THICKNESS_CENTRE – объект связан с центром пласта.

ONTOP – объект приписывается к верхнему слою ячеек пласта.

TOBOT – объект приписывается к нижнему слою ячеек пласта.

TOCENTRE – объект ассоциируется с центром пласта.

OBJECT_COORD – привязка гидрогеологического объекта осуществляется по координатам без коррекции с учетом особенностей строения пластов.

Для определения пласта, с которым связывается гидрогеологический объект используются следующие ключевые слова:

пласт	1 // номер пласта,
список_пластов	[1, 2].

Первое ключевое слово используется для простых объектов, которые могут быть связаны только с одним пластом, второе – для объектов, которые могут быть связаны с несколькими пластами одновременно.

Рассмотрим более подробно задание гидрогеологических объектов на примере рек. При разработке геофильтрационных моделей реки обычно представляются как внутренние границы первого или третьего рода. Граничное условие первого рода задается на реке в ситуациях, когда размер реки сопоставим или превышает размер расчетной ячейки, когда ширина и глубина реки малы по сравнению с характерным размером ячеек или коэффициенты фильтрации подрусловых отложений существенно ниже, чем коэффициент фильтрации пород контактирующего с рекой водоносного горизонта. Взаимодействие реки с ячейкой расчетной области описывается следующей формулой:

$$q - (H_{\text{ячейки}} - H_{\text{реки}})C,$$

где $H_{\text{ячейки}}$ – расчетный напор в ячейке, м; $H_{\text{реки}}$ – отметка уровня воды в реке, м; C – проводимость подрусловых отложений, м²/сутки. Последний параметр характеризует связь реки с водоносным горизонтом и включает две составляющих: а) искривление линий тока вблизи реки; б) фильтрационное сопротивление подрусловых отложений. Когда второй фактор доминирует (для рек с заcolmатированным руслом), параметр C можно выразить явным образом:

$$C = \frac{kLb}{m},$$

где k – коэффициент фильтрации подрусловых отложений, m – мощность подрусловых отложений, L – длина участка реки в пределах расчетной ячейки, b – средняя ширина реки.

При наличии экранирующего слоя становится возможной ситуация, когда река оказывается «подвешенной» по отношению к водоносному горизонту (рис. 1). В этом случае расход воды, фильтрующейся из реки в водоносный горизонт, не зависит от положения уровня грунтовых вод, т. е. программа для моделирования геофильтрации должна позволять изменять характер граничного условия на реке в процессе счета. Так, например, в программе NIMFA предусмотрена также возможность переключения граничного условия на реке при падении уровня ниже некоторой отметки с третьего на второй род. Потери воды из реки в водоносный горизонт рассчитываются по формуле

$$q = (H_{\text{отрыва}} - H_{\text{реки}})C,$$

где $H_{\text{отрыва}}$ – отметка отрыва уровня.

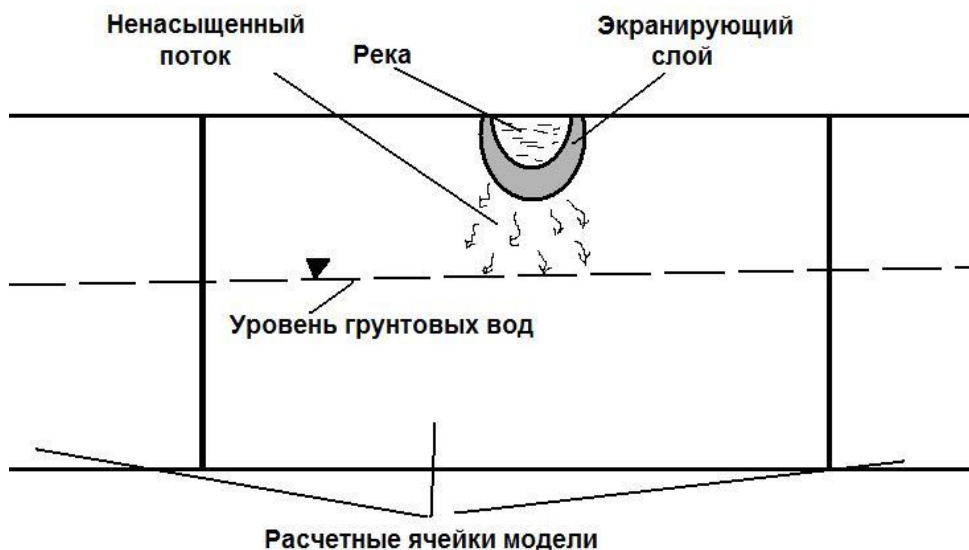


Рис. 1. Река, «подвешенная» по отношению к водоносному горизонту

Необходимо также отметить, что в геофильтрационных моделях река, как правило, является внешним по отношению к моделируемой области объектом, т. е. река не замещает расчетную ячейку, а лишь связана с ней через балансовое уравнение. Для крупных рек, размеры которых сопоставимы с размерами ячеек, наличие реки бывает необходимо учитывать через повышенные величины коэффициентов фильтрации водовмещающих пород.

В первой версии программы НИМФА единственным способом включения в гидрогеологические модели рек было их задание через набор «колен» – отрезков, на которых должны были быть определены параметры реки, включающие ширину реки, мощность подрусловых отложений, их коэффициент фильтрации, глубина реки и высота берегов. При перенесении реки на сеточную область высота берегов использовалась для расчета уровня в реке. Заметим, что уровень в реке является очень важным параметром, как и его задание путем отсчета от дневной поверхности, которая может строиться с существенными погрешностями, особенно значительными в долинах рек. Далее, ширина реки, мощность подрусловых отложений, их коэффициент фильтрации использовались для расчета одного параметра – проводимости речного ложа (Conductance), характеризующего

связь реки с грунтовым водоносным горизонтом. В большинстве случаев указанные параметры нельзя получить в полном объеме, а проводимость речного ложа оценивается при калибровке модели. В этом случае требование задания в модель трех параметров вместо одного, во-первых, приводит к лишним затратам труда, а, во-вторых, вводит в заблуждение пользователя относительно методики моделирования взаимодействия водоносных горизонтов с реками. Еще одним недостатком задания рек через набор отрезков является сложность калибровки моделей, включающих реки сложной конфигурации. Так, при снятии положения реки с какой-либо ГИС число таких отрезков может составлять несколько сотен.

В рамках разрабатываемой идеологии предполагается многовариантность способов задания объектов одного типа в зависимости от масштаба модели, имеющейся по нему информации и характера решаемой задачи.

В процессе работы над решением задач по внедрению программы НИМФА в практику гидрогеологических расчетов были предложены новые методики задания рек как линейных объектов, ассоциированных с определенным пластом. К первоочередной реализации была принята следующая методика, которая в настоящее время уже включена в модуль расчета начальных данных.

Исходные данные имеют следующую структуру:

```

Река_новая
{
  имя «Sheshupe»
  размерность_объекта LINEAR
  способ_ввода POLYLINES
  способ_связи_с_пластом WHOLE_THICKNESS
  речная_гидравлика NOT_INCLUDED
  уровень_начальный 25.0
  удельная_проводимость_начальная 2.0
  отметка_отрыва_уровня_начальная 21.0
  сегмент 1 {
    пласт 2
    уровень 5.0
    удельная_проводимость 2.0
    отметка_отрыва_уровня 2.0
    список_координатиз_файла
    prepare//rivers//sheshupe_25_5.blm»
  }
}

```

Реализованная в программе НИМФА методика расчета взаимодействия была опробована при разработке численных геофильтрационных моделей для объектов со сложной речной сетью (рис. 2, 3).

Для участка, расположенного в районе Нижнекамска, была решена прогнозная задача распространения фенольного и нефтяного загрязнения от полигонов хранения отходов, расположенных в приводораздельной области. По результатам расчетов даны рекомендации по защите водозабора подземных вод.

Геофильтрационная модель для района месторождения алмазов использована для расчета водопритоков к действующему карьеру и оптимизации системы водоотведения. Наряду с реками в модель были включены другие виды гидрогеологических объектов – карьер и скважины.

По мере развития НИМФА будет дополняться как по набору объектов, так и по новым опциям для их связи с моделируемой областью. Отдельные гидрогеологические объекты могут иметь свои собственные внутренние модели, которые используются для корректировки внутренних гра-

ничных условий в расчетной области (например, перерасчет уровня в водоеме на основе модели формирования его водного баланса) или позволяют оптимизировать режим работы самого объекта (например, подобрать насосное оборудование для скважины).

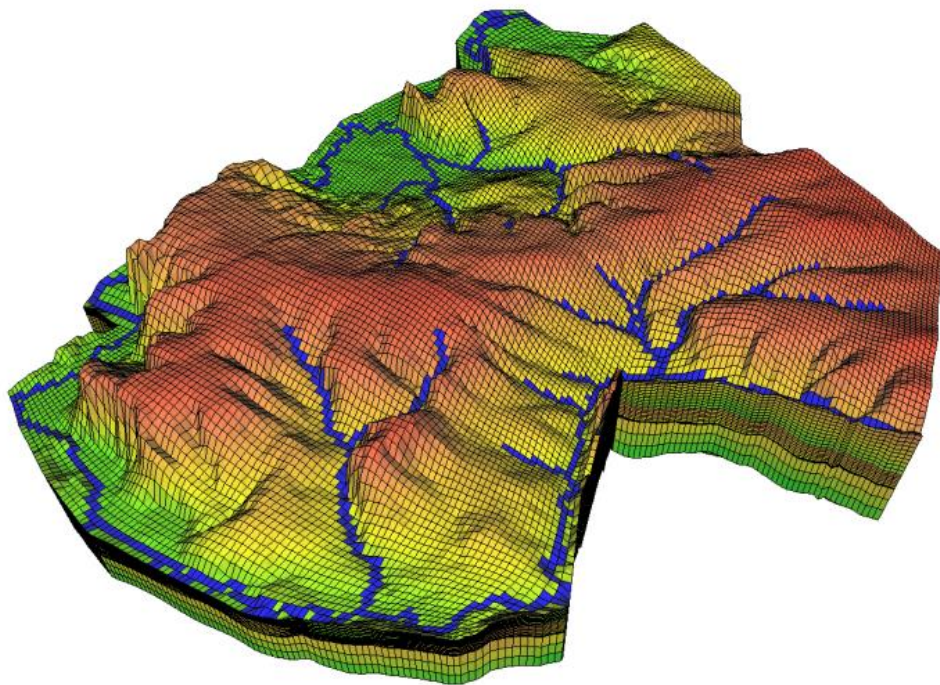


Рис. 2. Модель участка загрязнения подземных вод на юго-востоке Татарстана (Нижнекамск)

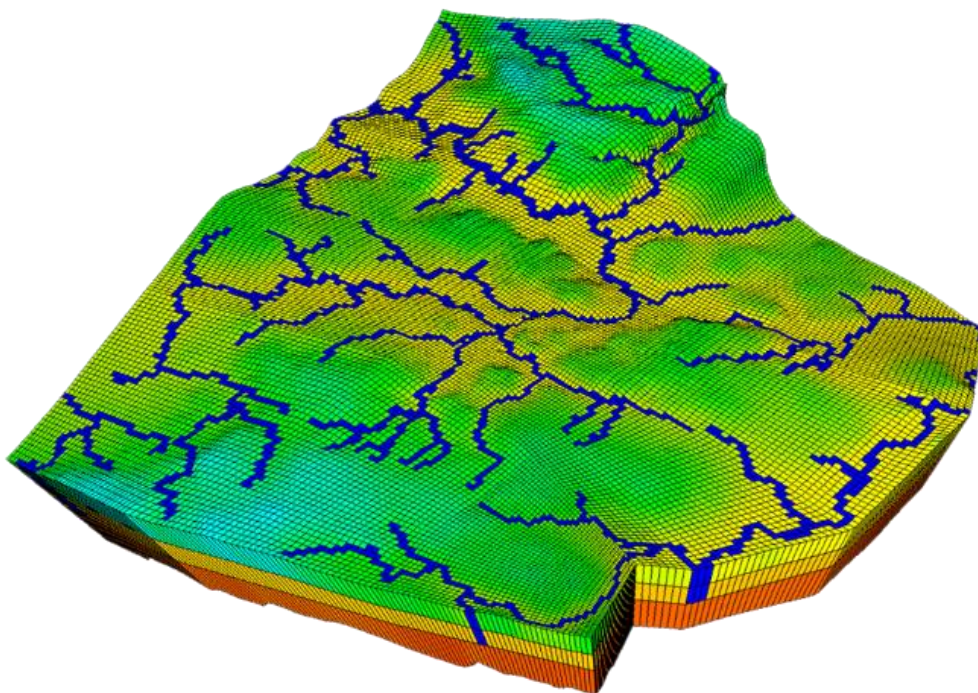


Рис. 3. Геофильтрационная модель района месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова

