

наступления Южно-Осетинского землетрясения получены по другим скважинам Кавказского региона.

Эффективность использования аттракторов для прогноза даты землетрясений проверена и в других регионах (Алтайском, Байкальском, Дальневосточном).

Выводы

Применение вышеприведенных методов оперативного анализа геодинамической обстановки и прогноза сейсмической опасности значительно повышает эффективность использования информации, получаемой при ведении мониторинга ГГД поля. В результате этого оценивается магнитуда и более точно — время предстоящего землетрясения, определяется также наиболее вероятное место его проявления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктура очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8.1. — С. 5–14.
2. Касахира К. Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985.
3. Куликов Г.В., Рыжов А.А., Гарифулин В.А., Лыгин А.М. Оценка геодинамической обстановки и сейсмической опасности по энергетическим параметрам и векторам напряжений гидрогеодеформационного поля // Разведка и охрана недр. — 2010. — № 7. — С. 19–24.
4. Куликов Г.В., Рыжов А.А. Прогноз землетрясений на основе гидрогеодеформационного мониторинга // Геодинамика и тектонофизика. — 2011. — Т. 2. — Вып. 2. — С. 194–207.
5. Куликов Г.В., Рыжов А.А., Лыгин А.М. Оценка геодинамической обстановки по энергетическим параметрам гидрогеодеформационного поля // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 3. — С. 51–56.
6. Сибгатулин В.Г., Перетокин С.А. Синергетика процессов в сейсмических очагах и краткосрочный прогноз землетрясений / Геодинамика и сейсмичность Средиземноморско-Черноморско-Каспийского региона: Тез. докл. междунар. семинара. — Геленджик: ККО ЕАГО, 2006. — С. 90.

© Куликов Г.В., Рыжов А.А., 2015

Куликов Геннадий Васильевич // genndvas@poch.ru
Рыжов Альберт Алексеевич // albert-ryjov@rambler.ru

УДК 556.3 (553.004.4)

Семендяева Л.В. (ФГУП «ВСЕГИНГЕО»)

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Рассмотрены современные компьютерные технологии и программные системы (комплексы) для численного моделирования гидрогеологических процессов. Дана информация о лучших отечественных профессионально-ориентированных компьютерных программах, позволяющих с большой эффективностью решать самые сложные проблемы математического моделирования месторождений подземных вод. Определен перечень характеристик и проведен сравнительный анализ наиболее распространенных систем моделирования. **Ключевые слова:** компьютерные технологии, программные средства, численная модель.*

Semendyaeva L.V. (VSEGINGEO)

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF COMPUTER TECHNOLOGIES FOR NUMERICAL MODELING OF HYDROGEOLOGICAL PROCESSES

Modern computer technologies and program systems (complexes) for numerical modeling of hydrogeological processes are discussed. The information is given about the best domes-

*tic professionally oriented computer programs, enabling with a high effectiveness to solve the most complex problems of mathematical modeling of groundwater fields. There is defined a list of characteristics and there is carried out the comparative analysis of the mostly distributed modeling systems. **Key words:** computer technologies, software, numerical model.*

В последние годы компьютерное гидрогеологическое моделирование подземных водных объектов как метод изучения и прогнозирования процессов геофильтрации и геомиграции прочно вошло в практику решения разнообразных задач гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии. В особенности для территорий с интенсивным использованием водных ресурсов, напряженным водным балансом и сложными гидрогеологическими условиями, когда водоносные горизонты характеризуются большой неоднородностью по фильтрационным свойствам, сложными границами распространения, метод математического моделирования является незаменимым.

Применение метода математического моделирования требует высокого уровня изученности гидрогеологических условий месторождения и информации о водоносных горизонтах в пределах области распространения гидравлического воздействия на них водоотбора подземных вод. Поэтому наиболее эффективное применение математического моделирования целесообразно проводить на эксплуатируемых месторождениях, для которых накоплены значительные материалы о режиме водоотбора, об уровне и гидрогеохимическом режиме подземных вод. Обширная информация по опыту эксплуатации месторождения позволяет в результате решения обратных задач более достоверно установить гидрогеологические параметры водоносных горизонтов, граничные условия, количественно оценить источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

Реальные возможности математического моделирования гидрогеологических процессов в значительной мере определяются степенью развития научно-методического, алгоритмического и программного обеспечения математических моделей гидрогеологических объектов. Исследования и разработки для создания системы специального математического обеспечения связаны в свою очередь с решением целого ряда методических, алгоритмических и программно-технических вопросов.

Последние десятилетия ознаменованы началом массовой компьютеризации фундаментальных и прикладных наук, связанной главным образом с развитием принципиально новых методов хранения и обработки информации, а также способов доступа к ней. Уже сейчас достижения в этой области применительно к гидрогеологии весьма положительные: локальные, региональные и глобальные базы и банки данных, поисковые и геоинформационные системы, почти не ограниченная сложностью математическая, в том числе статистическая обработка информации, 3D и ее динамическая визуализация, моделирующие программные средства. В то же время, состояние нарабо-

ток в этой сфере все еще находится не в полной мере пригодным для полноценного применения. Перевод накопившейся десятилетиями гидрогеологической информации на машинные носители, ее рациональное с точки зрения доступа представление и организация стандартизованными средствами и в форматах СУБД и ГИС, использование локальных и глобальных сетей, современное состояние теории и средств численного моделирования, интерфейс имеющихся крайне разнородных программных продуктов — эти и многие другие вопросы сегодня все еще далеки от полного разрешения.

Тем не менее, с постепенным преодолением множества возникающих на этом пути проблем, информационные (компьютерные) технологии постепенно становятся тем фундаментом, без которого полноценная профессиональная деятельность гидрогеолога становится уже невозможной. Важно подчеркнуть, что их разработка и применение не просто по-другому организуют обработку и представление информации, а переводят ее на качественно иной, более высокий уровень, позволяя получить новые знания на основе применения все более трудоемких расчетов и численного моделирования, которые без соответствующей компьютерной базы часто неосуществимы.

Применение компьютерных технологий в процессе картографирования разных масштабов привело к принципиально новому уровню карт геологического содержания, которые должны представлять собой геоинформационные системы.

В состав комплекса средств, реализующих основные принципы геоинформационно-математического моделирования, входят программы, обеспечивающие функционирование геоинформационных систем и картографирование (ArcGis, MapInfo 5, FOXPRO 3.0 и GMS 3.1). Они выполняют функции создания и ведения баз, графических и семантических данных математических моделей гидрогеологических объектов, а также позволяют решать на моделях содержательные гидрогеологические задачи. Кроме этого, имеется набор сервисных средств, обеспечивающих обмен данными между основными компонентами системы, а также программы, решающие задачи справочно-информационного обслуживания внешних и внутренних пользователей системы.

Если в отношении программных средств общего назначения Россия несколько отстает от развитых стран, то в профессионально ориентированном программном обеспечении, во всяком случае, гидрогеологическом отечественные программы и программные комплексы, как правило, не только не уступают зарубежным аналогам, но часто и превосходят их по своим возможностям. На российском рынке в настоящий момент существует множество программных продуктов для решения гидрогеологических задач.

Достаточно обширные обзоры компьютерных программных средств опубликованы в работах [1, 2, 3, 4, 5 и др.] Сразу оговоримся, что мы не рассматриваем абсолютно все программные продукты, представленные на российском рынке, включающие в себя операционные системы, антивирусы и т.д. Мы остановимся лишь

на тех, которые относятся к профессионально ориентированным научно-производственным программам и программным комплексам и пользуются определенным спросом в России и за рубежом. При этом, мы не будем сравнивать между собой программные продукты по их функциональным возможностям и определять их достоинства и недостатки при решении гидрогеологических задач, а остановимся на отдельных моментах, которые помогут будущему пользователю быстрее сориентироваться при выборе нужного программного продукта для моделирования тех или иных задач гидрогеологии.

Развитие гидрогеологического программного обеспечения (ПО) проводится в двух основных направлениях: гидродинамическом и гидрогеохимическом, которые, сближаясь, формируют класс наиболее сложных программ моделирования массо- и теплопереноса, обладающих возможностями более полноценного учета процессов геохимического взаимодействия в системе раствор-порода. За два последних десятилетия по каждому направлению накоплен большой объем весьма разнопланового ПО, в том числе и первые программные разработки, объединяющие гидродинамические и гидрогеохимические модули в виде единых геомиграционных моделей.

Гидродинамическое направление включает стандартные процедуры обработки результатов исследований с целью расчетной оценки фильтрационно-емкостных параметров, алгоритмы подсчета эксплуатационных запасов подземных вод и оптимизации размещения проектных скважин водозаборов или производительности систем нагнетания, а также процедур, обеспечивающих достаточно эффективный расчет многомерных сеточных гидродинамических моделей.

Гидрогеохимическое направление реализует алгоритмы наиболее характерных типов гидрогеохимических расчетов, связанных с ионно-солевым и газовым составом подземных вод и гидрогеохимическими процессами в системе вода-газ-порода. Особенностью последних является отсутствие принципиальных ограничений применяемых методов в зависимости от минерализации или ионной силы реальных природных растворов. Это обуславливает возможность расширения области применения гидрогеохимического блока программных систем на глубокозалегающие воды, характеризующиеся весьма широким разбросом возможной минерализации и состава.

Среди преимущественно гидродинамических пакетов программных систем наибольшее распространение получили программные разработки ЗАО «Геолинк Консалтинг», МГУ, ВСЕГИНГЕО, СПбГИ(У) — ВИМС, кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ТПУ и многие другие.

Перечисленные программные разработки являются примером наиболее перспективных отечественных гидродинамических программ гидрогеологического назначения, охватывают основные используемые на практике расчетные схемы фильтрации подземных вод, позволяя учитывать их неоднородность по плотности и вязкости, трехмерную изменчивость фильтрационно-

емкостных свойств многопластовых систем, напорный и безнапорный режимы фильтрации, разнообразные стационарные и динамически меняющиеся внешние и внутренние граничные условия.

Особый вид гидродинамического ПО представляют программы разработки А.В. Кирюхина (СПбГИ(У) — ДВО СО РАН) и О.П. Полянского, В.В. Ревердатто (ОИГГМ СО РАН, г. Новосибирск), предназначенные для моделирования тепло- и паропереноса в пределах гидротермальных систем, а также обособленно развивающееся программное обеспечение геокриологии.

В числе прикладных исследований последних лет отметим завершение под руководством д.г.-м.н. М.Б. Букаты разработки новой версии программного комплекса (HydroGeo), позволяющего создать численные трехмерные модели геофильтрации, геомиграции теплопереноса, включая протекание геохимических процессов в системе вода—порода.

Среди зарубежных аналогов перечисленных программных продуктов следует отметить программную систему конечно-разностного моделирования фильтрации подземных вод MODFLOW [13] (новая версия Visual MODFLOW Flex 2014.2.) и связанных с ней программ: MODPATH, MT3DMS, RT3D, PEST и др., разработчик — компания SchlumbergerWaterServices.

Другие программные средства для моделирования геофильтрации и геомиграции, разработанные специалистами Геологической службы США: L. Kenneth, Jr. Kipp — HST3D [11], Konikow L.F., Goode D.J., Hornberger G.Z. [12] и др., создавались независимо друг от друга и поэтому остаются информационно несовместимыми, в значительной мере дублируя друг друга.

Более мощной, по мнению автора, наиболее сложной как в постановочной части, так и в практической реализации, является программная система HST3D для моделирования фильтрации с переменными физическими свойствами, миграции загрязнений в подземной гидросфере. В систему HST3D интегрирован блок для решения тепловой и транспортной задачи. Программная система гораздо сложнее в освоении и предъявляет более высокие требования как к пользователю, так и к техническим средствам. Специальное программное обеспечение реализовано в виде комплекса программ FEFLOW [10], первая версия которой, была инициирована в 1979 г. в Институте механики Академии Наук ГДР. Система FEFLOW предназначена для моделирования трехмерного нелинейного потока транспортных процессов в насыщенных пористых средах методом конечных элементов.

Подобная ситуация наблюдается и по гидрогеохимическому ПО. Имеется большое число отечественных программных продуктов гидрогеохимического направления, многие из которых последовательно развиваются и совершенствуются уже в течение нескольких десятилетий. Сегодня популярность отечественных программных средств для моделирования геофильтрации и геомиграции практически не уступает зарубежным аналогам, которые отличаются значительно более высокой стоимостью и дополнительными трудностями,

связанными с освоением языка их интерфейса и документации.

Практически не имеют близких по возможностям зарубежных аналогов геохимические моделирующие системы, основанные на методе минимизации свободных энергий Гиббса, HCh (GIBBS) Ю.В. Шварова [9], Д.А. Кулик, К.В. Чудненко и др. (Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск) [6], С.Р. Крайнова, Б.Н. Рыженко [3] и др. Последние версии этих программ базируются на методе «констант равновесия» и позволяют в упрощенной постановке моделировать геохимические процессы в потоке подземных вод. Наиболее перспективными среди них являются генератор гидрогеохимических моделей В12 и полученная с его помощью серия узко прикладных программ-имитаторов SOXXXX фирмы СофДек В.Н. и С.В. Озябкиных (г. Санкт-Петербург), в т.ч. учитывающих геомиграцию [7].

К этому ряду примыкает и разработанный в ТПУ программный комплекс HydroGeo [8], объединяющий одновременно гидродинамические и гидрогеохимические модули. Последние его версии (HG32 для Windows), наряду с аналитическими гидродинамическими расчетами, включают полноценные одно- и двумерные сеточные модели геомиграции. В отличие от других гидрогеологических программных продуктов, данный ПК ориентируется как на традиционные гидрогеологические задачи, так и на специфику глубоко залегающих подземных вод и методов нефтегазовой гидрогеологии и может широко использоваться в этой области. Выполненный анализ и систематизация компьютерных технологий свидетельствуют об активном развитии рынка отечественных профессионально ориентированных гидрогеологических программных средств. Проблему сейчас представляет уже не столько наличие и доступность необходимых для моделирования программ, сколько уровень подготовки научных сотрудников и практических специалистов-гидрогеологов к их активному применению.

К недостаткам значительной части отечественных моделирующих гидрогеохимических программ можно отнести сложность их использования, обусловленную не вполне ясным не только для рядового пользователя, но и для специалистов, интерфейсом, необходимостью трудоемкой подготовки исходных данных, автоматизация которых обычно не предусматривается, и наличием как и во всех сложных программных разработках, недостаточно документированных внутренних ограничений в их применении.

Оценка качества программных систем (комплексов)

При впечатляющем разнообразии наукоемких программных продуктов, которыми характеризуется современный мировой и отечественный рынок, крайне важно как для разработчика, так и для потребителя этой продукции правильно ориентироваться в этом многообразии. Выбрать подходящий программный продукт и в дальнейшем эффективно его использовать можно на основании сравнительного анализа однотипных пакетов. Для сравнения программных продуктов, позволяющих решать задачи моделирования, был выбран относительно короткий перечень характеристик, которые,

по нашему мнению, могут достаточно полно характеризовать их основные возможности. Основными критериями оценки качества программных пакетов по мощности, степени интеллектуальности и удобству взаимодействия с ними, с точки зрения разработчика и пользователя, являются:

1. **Функциональность** — способность программной системы решать нужный набор задач.

В данном случае под функциональностью (поведение) системы понимается тестирование, обеспечивающее проверку корректности функционирования системы на нескольких основных вариантах ее использования, включающих в себя и некоторые ошибочные ситуации. Распространенность такого выбора объясняется тем, что тестирование базовой функциональности позволяет с минимальными затратами выявить большинство наиболее грубых отклонений от стандарта. При тестировании должны быть выявлены основные характеристики программного продукта — точность, совместимость с необходимым набором других систем, соответствие имеющимся стандартам, нормативным и законодательным актам, способность предотвращать не разрешенный доступ к данным и другим элементам программного обеспечения.

2. **Надежность** — способность программного продукта выполнять определенные функции при заданных условиях в течение заданного периода времени с достаточно большой вероятностью. Степень надежности характеризуется вероятностью безотказной работы программного продукта в определенный период времени. И хотя абсолютная надежность современного программного обеспечения, по-видимому, недостижима, до сих пор не существует общепринятой меры надежности компьютерных программ. Основная причина такого положения состоит в том, что источником ненадежности программ служат содержащиеся в них ошибки, и если ошибки отсутствуют, то программа абсолютно надежна. По существу, все меры по обеспечению надежности программ направлены на то, чтобы свести к минимуму (если не исключить вообще) ошибки при разработке и как можно раньше их выявить и устранить после написания программы. Следует заметить, что безошибочные программы, конечно же, существуют, однако современные программные системы слишком велики и почти неизбежно содержат ошибки. Это обстоятельство отмечается многими авторами и известно любому программисту-практику. Существует, по-видимому, некий психологический барьер, не позволяющий признать факт наличия ошибок в программном обеспечении неизбежной реальностью, поскольку не существует точного критерия, позволяющего определить максимальный размер свободной от ошибок программы. Всегда остается надежда, что в данной конкретной программной системе их не осталось.

3. **Удобство использования или практичность** — способность программного обеспечения быть удобным в эксплуатации и быть рассчитанным на технический уровень эксплуатирующего персонала, обладать соответствующим пользовательским интерфейсом и русифицированной документацией.

4. **Переносимость** — способность сохранять работоспособность при переносе из одного окружения в другое, включая организационные, аппаратные и программные аспекты окружения.

С точки зрения пользователя указанные характеристики необходимо дополнить двумя факторами:

эффективность — способность решать задачи пользователей с необходимой точностью при использовании в заданном контексте. Эффективность программного обеспечения должна разумно расходовать ресурсы и обладать достаточными скоростными и временными характеристиками;

продуктивность — способность эффективно представлять полученные результаты в рамках ожидаемых затрат ресурсов.

Подводя итог, отметим, что потенциальному пользователю предлагается при выборе программного продукта для моделирования использовать следующие критерии оценки качества: четкость концепции программной системы, понятность, демонстрационные возможности, наглядность и полнота документации, комфортность эксплуатации, соответствие программной системы задачам: текущим, ближайшего будущего, а также отдаленной перспективы. К критериям оценки программного продукта традиционным подходом является также и цена.

Что касается профессионалов-аналитиков, желающих не только пользоваться готовыми методиками анализа, но и реализовывать собственные, одним из важнейших факторов является прозрачность методов в процессорной части программы.

В целом при оценке и выборе программных систем для моделирования рекомендуется на основании перечисленных выше критериев самостоятельно решать, какие системы наиболее предпочтительны при решении конкретной задачи.

Остановимся более детально на возможностях программной системы ССПО TOPAS (разработка ФГУП «ВСЕГИНГЕО»). Выполненное на стадиях разработки тестирование системы (тесты: «Спираль-Н», «Круг», «Баланс», «Безнапорный поток», «Долина») и проведенное сравнение с имеющимися аналитическими решениями, характеризуют надежность разработанного программного обеспечения, что способствует эффективному использованию программной системы на практике.

Среди результатов внедрения ССПО TOPAS следует отметить разработку комплексной системы геофильтрационной и геомиграционной моделей района промплощадки Калининской АЭС, которая дает возможность оперативного реагирования по прогнозу развития аварийных ситуаций. Наличие имеющегося программного обеспечения позволяет создать для объектов типа АЭС постоянно действующую модель с целью решения на ней тактических и стратегических природоохранных эколого-гидрогеологических задач.

В числе новых направлений гидродинамических исследований с использованием программной системы ССПО TOPAS — изучение процессов фильтрации подземных вод и других флюидов в гидротермальных сис-

темах областей современного вулканизма. Создана трехмерная модель Паратунского месторождения термальных вод на Камчатке, которая достаточно хорошо воспроизводит температурные поля, определяет условия эксплуатации термальных вод месторождения и позволяет сделать предварительные выводы о роли тепловой дифференциации.

С использованием ССПО TOPAS построена система комбинированного использования поверхностных и подземных вод. Разработанные методические подходы апробированы на примере Калужского месторождения, для повышения производительности которого рассматривается возможность увеличения запасов подземных вод с помощью поглощающих скважин в пойме р. Ока в период весеннего подъема уровня в ней.

Система является достаточно гибкой, легко осваивается интерпретаторами, обеспечивает меньшую по сравнению с другими комплексами трудоемкость, имеет явные преимущества, обеспечивающие ее предпочтительное использование при моделировании. Иными словами, наши программные продукты надежны и выполнены на базе современных достижений математики, а также методов численного моделирования, просты в использовании с множеством уникальных возможностей (графические окна, позволяющие увидеть результаты решения в процессе счета, цифровые карты-подложки и т.д.).

Для простоты сравнения пакетов нами учитывались лишь встроенные функции. Это объясняется тем, что ряд пакетов, в том числе и ССПО TOPAS, позволяющий добавлять оригинальные функции за счет имеющегося у нее инструментария — встроенного языка программирования более высокого уровня (программного кода (C++)).

Приведенное описание программных комплексов не покрывает весь спектр проблем, связанных с математическим моделированием подземных вод. Надеемся, что более подробная информация, изложенная в публикациях, позволит пользователю сложных пакетов прикладных программ глубже войти в курс проблемы.

В целом при оценке и выборе средства моделирования рекомендуется самостоятельно решать, какие программные системы (комплексы) наиболее приспособлены и надежны для решения конкретной задачи и, соответственно, сопоставлять их функциональные возможности.

Выполненный анализ и систематизация в области разработки компьютерных технологий и накопленный опыт при работе с программными системами позволяют на данном этапе обозначить следующие выводы:

1. Приведенный перечень относительно известных публикаций, связанных с разработкой программного обеспечения математических моделей гидрогеологи-

ческих объектов, не позволяет сделать однозначные выводы о состоянии исследований и разработок по затронутому направлению в виду отсутствия сопоставления численных решений, полученных по различным программным системам и комплексам. К тому же информационная разобщенность проблемно-ориентированных программ делает затруднительным выбор единого универсального программного комплекса.

2. На данном этапе, с точки зрения пользователя и разработчика программных систем, чрезвычайно важно не допустить монополизацию рынка, искусственного навязывания потребителям «единственно верных» технологий и направлений их развития.

3. Следует стимулировать научные разработки в области численного моделирования гидрогеологических процессов и, как следствие, развитие отечественных высокоэффективных программных средств и компьютерных технологий, способных эффективно конкурировать с зарубежными программными разработками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Букаты М.Б. Численное моделирование гидрогеохимических процессов в фильтрационном потоке / Гидрогеология и инженерная геология. Геозекология и мониторинг геологической среды. — Томск, ТПУ, 2001. — С. 10–13.
2. Геоинформационная система GeoLink. Версия 2.хх. Руководство пользователя. — М.: Геолинк Консалтинг, 2002. — 619 с.
3. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. / Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. — М.: Наука, 2004. — 676 с.
4. Крашин И.И., Орфаниди Е.К., Семендяева Л.В. и др. Численное моделирование процессов фильтрации и миграции для решения задач гидрогеологии // Разведка и охрана недр. — 2009. — № 9. — С. 42–47.
5. Кузнецов Д.С., Рошаль А.А. Разработка программных средств моделирования процессов региональной миграции веществ в подземных водах: II конф. пользователей и партнеров «Геолинк» (доклады и сообщения). — М.: Инфоком-Гео, 2001. — С. 97–102.
6. Кулик Д.А., Чудненко К.В., Карпов И.К. Алгоритм физико-химического моделирования эволюции локально-равновесных резервуаров, связанных потоками подвижных групп фаз. // Геохимия. — 1992. — № 6. — С. 858 — 879.
7. Озябкин В.Н., Озябкин С.В. Программные имитаторы для моделирования геохимической миграции неорганических загрязнений // Геозекология. — 1996. — № 1. — С. 104–120.
8. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТПУ. Геология, поиски и разведка полезных ископаемых Сибири. — 2002. — Т. 305. — Вып. 6. — С. 348–365.
9. Шваров Ю.В. HCh для Windows как инструмент решения нестандартных задач термодинамического моделирования / Новые идеи в науках о Земле: IX междунар. конф. — М.: РГГУ, 2009.
10. Diersch H.-J.G. Feflow 5.1 User's Manual. — Berlin: WASY, 2004. — 168 pp.
11. Kenneth L., Kipp Jr / HST3D A computervcodefor simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow system, U.S. Geological Survey Investigations Report, 1997. — 630 pp.
12. Konikow L.F., Goode D.J., Hornberger G.Z. A Three- Dimensional Method-of-Characteristics Solute-Transport Model (MOC3D): Water-Resources Investigations Rep. 96-4267. — Reston: USGS, 1996.
13. Visual MODFLOW. Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, 1998.

© Семендяева Л.В., 2015

Семендяева Людмила Владимировна // semendyaeva_l@mail.ru