

## ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА «НИМФА» НА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ОБЪЕКТОВ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

*О. И. Бутнев, И. В. Горев, М. Н. Бардина, В. В. Горев, С. С. Колесников,  
А. А. Куваев<sup>1</sup>, О. И. Кузьмина, П. А. Машенькин, В. А. Пронин,  
М. Е. Семенов<sup>1</sup>, М. Л. Сидоров*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров,  
<sup>1</sup>ФГУГП «Гидроспецгеология», г. Москва

Программный комплекс «НИМФА» (далее ПК «НИМФА») разрабатывается в РФЯЦ-ВНИИЭФ для моделирования фильтрации и переноса примесей подземными водами в пространстве со сложной геологической структурой. Программа ориентирована на решение задач с помощью полномасштабного комплексного моделирования на современных высокопараллельных суперЭВМ (десятки тысяч процессоров). Развитие пакета шло около 15 лет – сначала по грантам МНТЦ, затем в рамках проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», который был принят Комиссией при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России. Коллектив разработчиков работал и до сих пор работает в тесном контакте со многими научными организациями страны. В частности, с Институтом проблем механики, МГУ им. М. В. Ломоносова, МФТИ (Москва); СПбГУ, ИГЭ РАН (Санкт-Петербург), Казанским Государственным Университетом (КГУ).

Базовые модули ПК «НИМФА» предусматривают возможность моделирования напорной и безнапорной нестационарной одно- и двухфазной фильтрации в анизотропной среде, а также конвективно-диффузионного массопереноса с учетом диффузии, дисперсии, адсорбции, химических взаимодействий контаминантов. В разные годы, для решения конкретных задач, реализован ряд дополнительных моделей, характеризующих следующие процессы и явления:

- модель трещиновато-пористой среды (двойной пористости);
- модель неньютоновских свойств жидкости (зависимость вязкости от скорости течения);
- обобщенная модель поверхностного стока;
- модель плотностной конвекции;
- модель устойчивости бортов карьеров;
- миграция радионуклидов на коллоидах.

В 2012 г., по завершению проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», пакет получил сертификат соответствия федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. К этому моменту ПК «НИМФА» прошел тестирование на специально разработанном наборе тестов. Его средствами построен ряд геофильтрационных и геомиграционных моделей (площадки Балтийской АЭС, Нижнекамского промышленного узла, Соль-Илецкого месторождения соли, района кимберлитовой трубки «Архангельская»). Также продукт использовался для реальных производственных задач следующих предприятий: ОАО «ВНИМИ», ОАО «Энергоизыскания» (Санкт-Петербург) и «НПО Геоцентр РТ» (Казань). Проведены кросс-верификационные расчеты по разработанным моделям, показавшие хорошее совпадение с данными наблюдений и с результатами, полученными по пакету ModFlow.

С начала 2014 г. развитие пакета осуществляется в соответствии с «Программой доработки и внедрения инновационного отечественного программного продукта «Программный комплекс «НИМФА» на период 2013–2016 гг.», утвержденной генеральным директором Госкорпорации «Росатом» С. В. Кириенко. Программа предусматривает доработку пакета, его аттестацию в НТЦ ЯРБ и внедрение в качестве отраслевого стандартного программного продукта.

В рамках этой программы в 2014 г. проведен анализ, доработка, верификация и адаптация ПК «НИМФА» в части решения геофильтрационных задач. Работы выполнялись на базе геофильтрационных моделей площадки № 6 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и водозабора № 3 ОАО «ГНЦ «НИИАР», разработанных ранее в ФГУП «Гидроспецгеология» с помощью программного комплекса «PMWIN-8» (далее ПК «PMWIN-8»), широко используемого в настоящее время в практике гидрогеологических расчетов и основанного на семействе программ «MODFLOW».

Модель площадки № 6 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» характеризуют: резкое различие фильтрационных свойств в смежных пластах (изменение коэффициента фильтрации на 3–4 порядка), сложная геометрия слоев с изменением мощностей в пределах модели на 2 порядка и наличием фильтрационных окон в слабопроницаемых слоях. Представление о сложности пластового строения может дать геологическая модель (рис. 1). Средствами ПК «НИМФА», с использованием данных мониторинга, разработана расчетная сеточная модель (рис. 2) и проведена серия кросс-верификационных расчетов в ПК «PMWIN-8» и ПК «НИМФА».

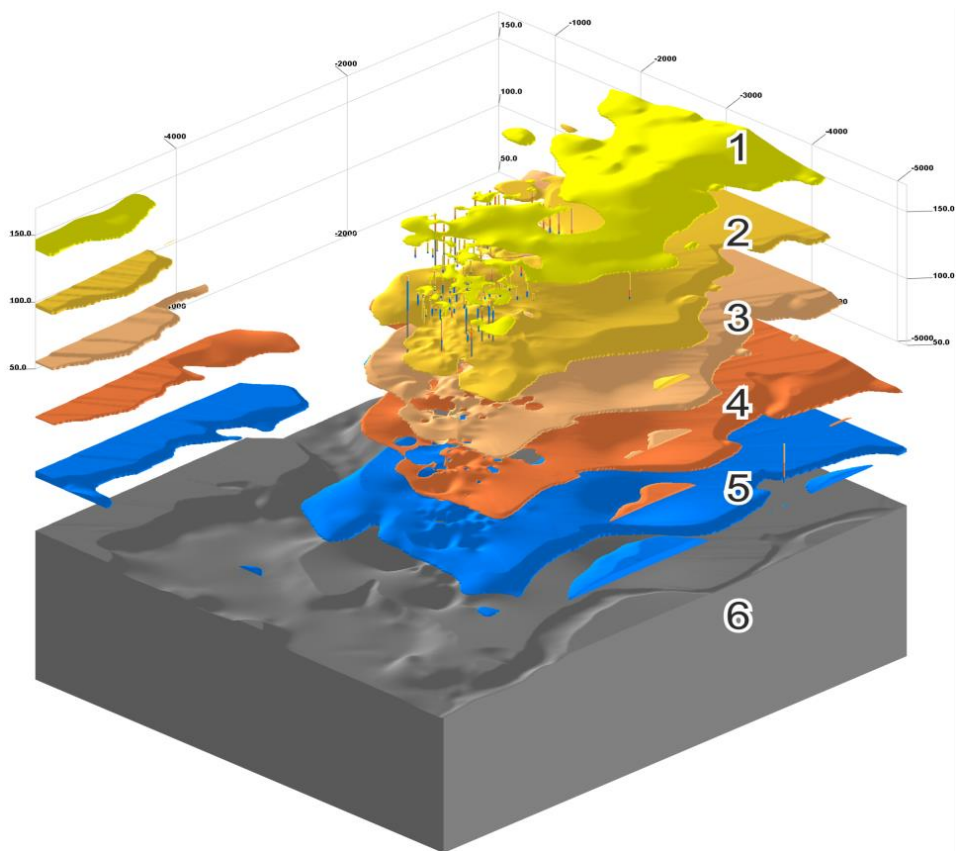


Рис. 1. Цифровая трехмерная геологическая модель площадок 6 и 14: 1 – верхнечетвертичные техногенные отложения; 2–4 – отложения днепровского оледенения (2 – надморенные флювиогляциальные отложения), 3 – гляциальные отложения (морена); 4 – подморенные флювиогляциальные отложения); 5 – отложения батского яруса средней юры; 6 – верхнекаменноугольные и пермские отложения

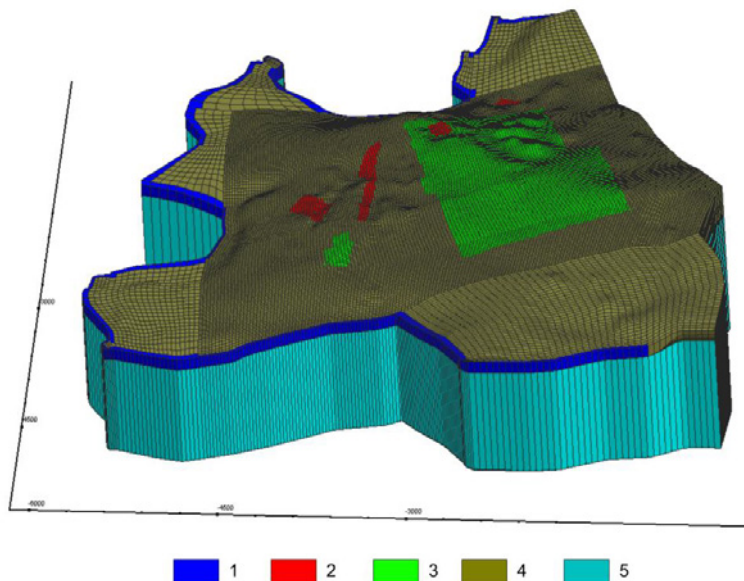


Рис. 2. Геофильтрационная модель площадок 6 и 14, реализованная с помощью ПК «НИМФА»: 1 – реки; 2 – источники загрязнения; 3 – зоны техногенной инфильтрации; 4 – песчано-глинистые отложения; 5 – водоносный горизонт трещиноватых известняков карбона

Анализ результатов решения (рис. 3) свидетельствует, что рассчитанное распределение напоров по модельным слоям в целом повторяет базовое решение, полученное с использованием ПК «PMWIN-8» (разность средних значений напоров по пластам не превышает 0,25 %). Однако на отдельных участках модельной области при поточечном сравнении расчетных полей выявлены расхождения (около 5 %).

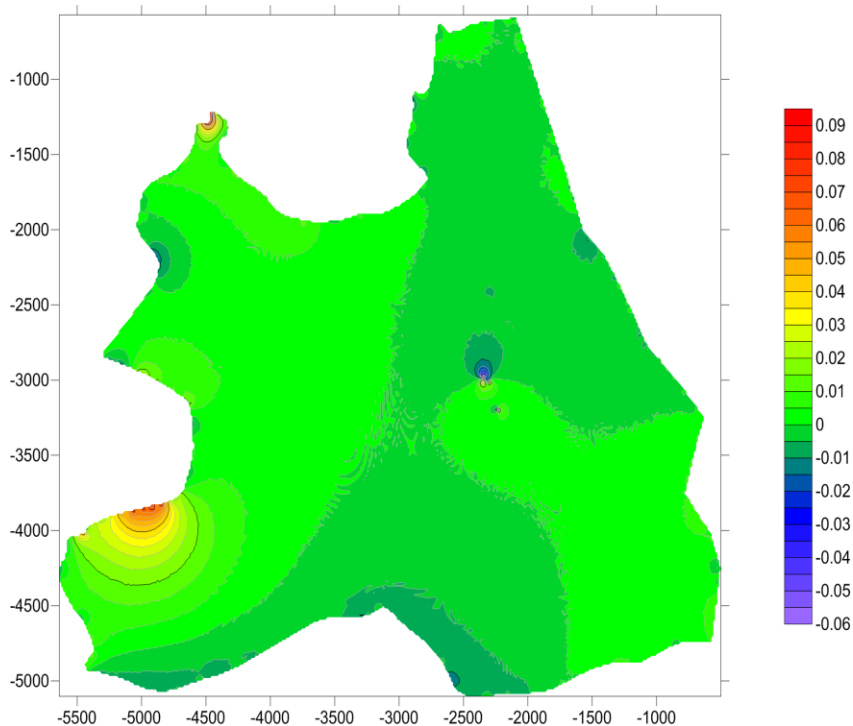


Рис. 3. Распределение разности напоров подземных вод в V-модельном слое, рассчитанных с помощью ПК «PMWIN-8» и ПК НИМФА

Второй верификационной задачей явилось моделирование средствами ПК «НИМФА» участка водозабора № 3 ОАО «ГНЦ «НИИАР» (рис. 4) и проведение серии кросс-верификационных расчетов по ПК «PMWIN-8» и ПК «НИМФА». Особенностью данного участка является отсутствие резко выраженных различий в фильтрационных свойствах водовмещающих отложений в плане и в разрезе, а также практически горизонтальный характер залегания модельных слоев.

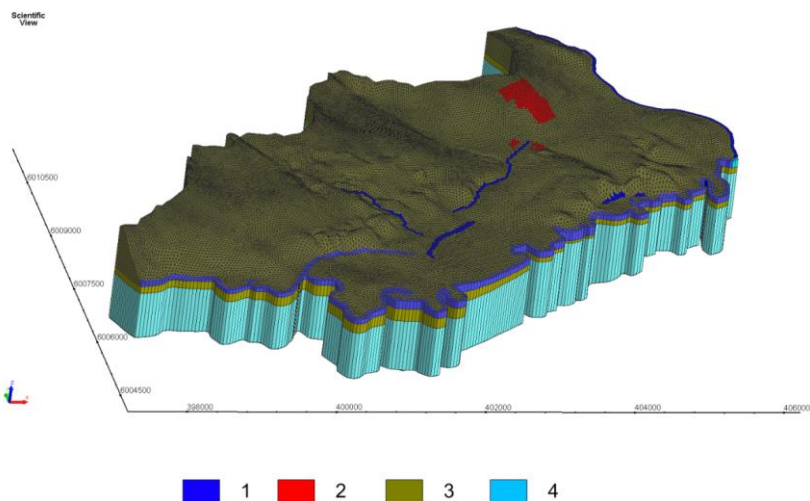


Рис. 4. Трехмерная расчетная модель участка водозабора № 3 ОАО ГНЦ «НИИАР», реализованная с помощью ПК «НИМФА»: 1 – реки и водоемы; 2 – источники загрязнения подземных вод; 3–4 – модельные слои

Анализ результатов верификационных расчетов (рис. 5) показывает удовлетворительную сходимость полей модельных напоров. Величина их абсолютного отклонения достигает 1 м, а относительного не превышает 4 % (при перепаде напоров в пределах модельного слоя равном 25 м). Стандартное отклонение модельных напоров, полученных по результатам расчетов по ПК «PMWIN-8» и ПК «НИМФА», составило 0,04 м.

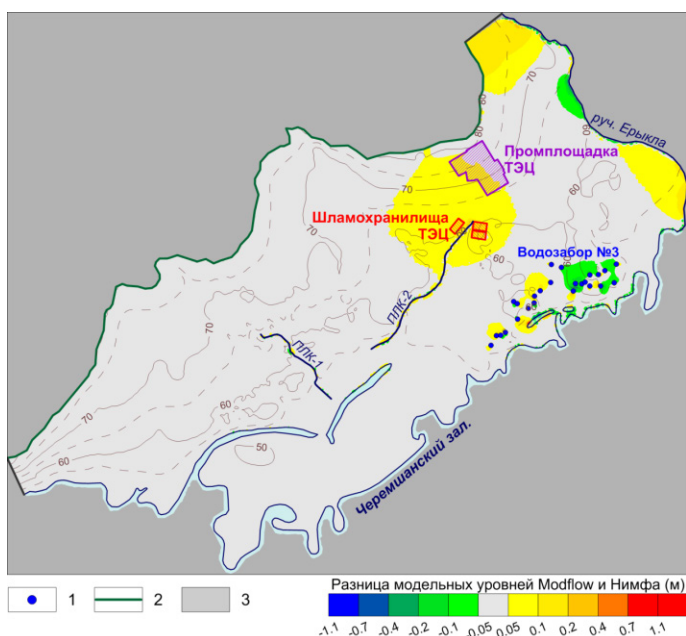


Рис. 5. Распределение разности напоров подземных вод в I-модельном слое, рассчитанных с помощью ПК «PMWIN-8» и ПК «НИМФА»: 1 – водозаборные скважины; 2 – граница с заданным удельным расходом; 3 – неактивная область