УДК 556.34: 504.4: 551.21

Геофильтрационное и геомиграционное моделирование как инструмент оценки экологических рисков в вулканических регионах

Д.Р. Сулеева

ООО «ПроТехИнжиниринг», Санкт-Петербург, Россия
Diana.Suleeva@pte.eurochem.ru

В работе рассматривается применение численного геофильтрационного и геомиграционного моделирования для прогнозирования распространения опасных флюидов и оценки экологических рисков. На примере промышленной территории площадью 27.66 км² с использованием программного комплекса Visual MODFLOW Flex 7.0 построена 22-слойная гидрогеологическая модель, учитывающая многослойное строение и фильтрационные свойства водоносной системы. Продемонстрированы результаты калибровки модели по данным режимных наблюдений и выполнен прогноз миграции высокоминерализованных рассолов.Особое внимание уделено оценке эффективности пяти вариантов инженерной защиты подземных вод, среди которых комбинированный подход наилучшие результаты, значительно снизив разгрузку загрязненных вод в поверхностные водотоки. Обоснована универсальность разработанного методологического подхода и возможность его адаптации для решения задач экологической безопасности и прогнозирования миграции природных гидротермальных флюидов в районах активного вулканизма.

Groundwater Flow and Transport Modeling as a Tool for Environmental Risk Assessment in Volcanic Regions

Diana R. Suleeva

ProTechEngineering LLC, St. Petersburg, Russia

The paper discusses the application of numerical groundwater flow and solute transport modeling to predict the migration of hazardous fluids and assess environmental risks. Using a 27.66 km² industrial site as a case study, a 22-layer hydrogeological model was constructed in Visual MODFLOW Flex 7.0, incorporating the multi-layered structure and hydraulic properties of the aquifer system. The model calibration results based on monitoring data are presented, and a transport forecast for highly mineralized brines is performed. Special focus is given to evaluating the effectiveness of five engineering protection scenarios for groundwater, among which a combined approach demonstrated the best results, significantly reducing contaminated water discharge into surface streams. The study demonstrates the versatility of the developed methodological approach and its adaptability for ensuring environmental safety and predicting natural hydrothermal fluid migration in active volcanic areas.

Интенсивное промышленное освоение территорий сопровождается образованием техногенных источников загрязнения подземных вод, включая высокоминерализованные рассолы. Одновременно в вулканических регионах естественные гидротермальные системы формируют аналогичные по составу флюиды [1] с повышенной концентрацией хлоридов, сульфатов и тяжёлых металлов [2]. В обоих случаях возникает потребность в

прогнозировании миграции растворённых веществ и обосновании мер по минимизации экологических рисков.

В работе представлены результаты геофильтрационного и геомиграционного моделирования для территории с объектами хвостового хозяйства. Модель охватывает площадь 27.66 км², имеет пространственную дискретизацию 20×20 м и включает 22 расчётных слоя, отражающих многослойное строение водоносной системы: техногенные отложения (Кф=10 м/сут), четвертичные пески и суглинки (Кф=0.5–5 м/сут), пестроцветную толщу и терригенно-карбонатную толщу (Кф=0.5–1 м/сут). Расчёты выполнены в программном комплексе Visual MODFLOW Flex 7.0 (модули MODFLOW, MT3DMS) [3].

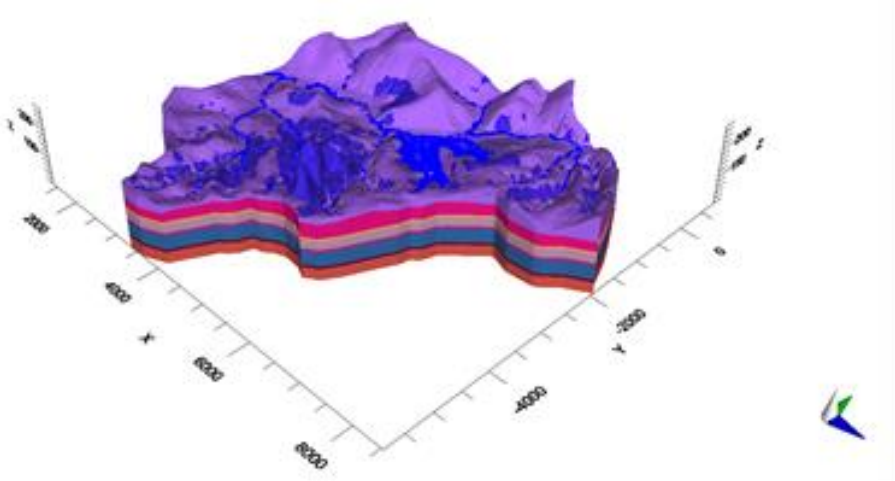


Рисунок 1 – Схематическая 3d-модель гидрогеологического пространства

Калибровка фильтрационной модели проведена по данным режимных наблюдений за расходами рек и дренажных систем. Ошибка по расходам рек составила 2% (фактический расход 11 150 м³/сут против модельного 10 961 м³/сут). В условиях нарушенного режима питание подземных вод осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков (43% притока) и подтока по границам третьего рода (49%). Основная разгрузка приходится на реки (71%) и дренажные системы (28%).

Для оценки миграции загрязняющих веществ решалась конвективно-дисперсионная задача [4] с дифференцированными значениями эффективной пористости: 0.14 для четвертичных отложений и 0.02 для трещиноватых пород. В качестве модельного загрязнителя задана концентрация 390 г/л хлоридов натрия и калия. Моделирование показало, что без защитных мероприятий фронт загрязнения достигает поверхностных водотоков в течение 5–10 лет.

Оценена эффективность пяти вариантов инженерной защиты подземных вод [5]. Наиболее эффективным признан комбинированный вариант «полная противофильтрационная завеса + дренаж», обеспечивающий снижение разгрузки загрязнённых вод в реки до 53.1% от исходного значения и увеличение доли перехвата дренажными системами до 46.9%. Такой подход позволяет не только ограничить распространение загрязнения, но и обеспечить управляемый отвод потенциально опасных флюидов.

Полученные результаты демонстрируют универсальность методов геофильтрационного и геомиграционного моделирования. Разработанная методология применима не только для оценки техногенного воздействия, но и для прогнозирования миграции природных загрязнителей в вулканических регионах. Учёт гидрогеологической неоднородности, трещиноватости пород и динамики подземных потоков позволяет адаптировать подход для решения задач экологической безопасности в районах активных вулканов и гидротермальных полей, где состав и поведение термальных флюидов сопоставимы с промышленными рассолами.

Список литературы

1. *Kalacheva E.* Volcano-hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: Geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur / *E. Kalacheva, Y. Taran, T. Kotenko et al.* // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2016. V. 310. P. 118–131.

2. *Гирина О.А.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / *О.А. Гирина, Е.А. Лупян, А.А. Сорокин и др.* // Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. 192 с.

3. Visual MODFLOW Flex. User manual. Waterloo Hydrogeologic. 2015.

4. *Лукнер Л.* Моделирование миграции подземных вод / *Л. Лукнер, В.М. Шестаков* // М.: Недра, 1986. 484 с.

5. *Гольдберг В.М.* Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / *В.М. Гольдберг, Газда* С. // М.: Недра. 1984. 262 с.