



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Прохорова Елена Витальевна

Доцент кафедры экономики предприятия, Белорусский государственный
университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Эта статья представляет собой всесторонний анализ математического моделирования распространения загрязнителей в грунтовых водах — процесс, который стал критически важным инструментом в области защиты окружающей среды и рационального управления водными ресурсами. Мы детально рассматриваем три основополагающих гидрогеологических механизма, определяющих перенос растворенных веществ в толще грунта: **адвекцию**, **дисперсию** и **сорбцию**. В работе описываются основные методологические подходы, используемые сегодня (аналитические, численные и стохастические модели), их преимущества и, что немаловажно, их ограничения применительно к гетерогенным природным системам. Особое внимание уделено тому, как результаты моделирования используются на практике — для точного прогнозирования границ загрязнения, оценки рисков для водозаборных объектов и научного обоснования восстановительных работ. Мы утверждаем, что высокоточное моделирование служит единственной надежной основой для принятия стратегических управленческих решений, направленных на долгосрочное сохранение подземных водных ресурсов.

Ключевые слова: грунтовые воды, моделирование, загрязнители, адвекция, дисперсия, сорбция, гидрогеология, численные методы, прогнозирование загрязнения, экологическая безопасность.

Введение: Актуальность Проблемы

Грунтовые воды сегодня, без преувеличения, являются одним из самых ценных и при этом наиболее уязвимых природных богатств, служа ключевым источником питьевого и технического водоснабжения для огромной части человечества. В условиях, когда темпы промышленного производства и сельскохозяйственной деятельности неуклонно растут, проблема попадания загрязнителей в подземные водные объекты приобрела критический экологический и социальный масштаб.

Инфильтрация промышленных стоков, сельскохозяйственных химикатов, нефтепродуктов или просто продуктов разложения бытовых отходов приводит к долгосрочной, а зачастую и необратимой, деградации этого ресурса. Причина такой уязвимости кроется в том, что процессы естественного самоочищения в пористой среде протекают крайне медленно и часто не справляются с нейтрализацией крупных объемов загрязнений. Именно поэтому математическое моделирование распространения загрязнителей стало **незаменимым прогностическим инструментом**. Его задача состоит не просто в фиксации уже свершившегося факта загрязнения, а в способности количественно, с высокой степенью детализации, предсказать динамику этого процесса во времени и пространстве. Только обладая таким прогнозом, можно реалистично оценить потенциальный экологический ущерб и, главное, разработать эффективные, экономически взвешенные и научно обоснованные стратегии для **предотвращения** или оперативной **ликвидации последствий**. От точности такого гидрогеологического прогноза напрямую зависит успех всех долгосрочных природоохранных мероприятий и гарантия устойчивого водопользования для будущих поколений.

Теоретические Основы Процессов Переноса

Перенос растворенных загрязняющих веществ в водоносном горизонте — это сложное физико-химическое явление, которое всегда описывается как совокупность трех основных, тесно связанных между собой механизмов: **адвекции, дисперсии и сорбции**. Глубокое понимание их совместной работы является краеугольным камнем для построения любой надежной математической модели.

Адвекция, или конвективный перенос, выступает здесь как основной движущий механизм. Она описывает перенос массы загрязнителя, который буквально увлекается за собой самим потоком грунтовых вод. Скорость этого адвективного переноса определяется двумя главными параметрами водоносного горизонта: **градиентом напора** и его фильтрационными свойствами, такими как **коэффициент фильтрации** и **эффективная пористость**. Важно отметить, что адвекция происходит строго вдоль направления движения воды, перемещая фронт загрязнения со скоростью, которая в среднем ниже скорости потока, измеренной на макроуровне. Математически это движение описывается хорошо известным **Законом Дарси**, устанавливающим связь между скоростью фильтрации и гидравлическим градиентом.

Гидродинамическая дисперсия, напротив, работает как механизм рассеивания. Она неизбежно размывает границы загрязненного фронта, увеличивая его площадь. Причиной этого явления служит микроскопическая неоднородность потока внутри грунтовой толщи: вода течет быстрее в центральной части пор и значительно медленнее у их стенок, а также вынуждена двигаться по разнообразным, неравным по длине путям, обтекая частицы грунта.

В дисперсии выделяют два компонента: молекулярную диффузию, которая значима только при очень низких скоростях, и механическую дисперсию, доминирующую при обычных рабочих скоростях. Величина дисперсии описывается через коэффициент, который учитывает рассеивание как в направлении самого потока (продольная дисперсия), так и перпендикулярно ему (поперечная дисперсия). Дисперсия, действуя всегда, уменьшает пиковую концентрацию в ядре загрязнения, но за счет этого увеличивает общий объем загрязненной воды, по сути, разбавляя вещество.

Третий ключевой процесс — **сорбция** — включает в себя химическое взаимодействие, которое приводит к **ретардации** или задержке загрязнителя. Этот механизм описывает адсорбцию (закрепление вещества на поверхности частиц грунта) и десорбцию (обратный процесс). Сорбция — это химически активный процесс, который систематически замедляет эффективную скорость движения загрязнителя относительно чистой воды. Для адекватного моделирования сорбции необходим учет сразу трех факторов: физико-химических свойств самого вещества, типа грунта (например, содержание глинистых минералов или органического вещества) и химического состава воды (в частности, ее pH и ионной силы). В моделировании используются такие классические описания как **линейная изотерма**, **изотерма Фрейндлиха** и **изотерма Лэнгмюра**. Понимание сорбции имеет решающее значение, поскольку именно она определяет, насколько долго водоносный горизонт останется загрязненным.

Все эти три механизма объединяются в единое, фундаментальное **уравнение конвективно-дисперсионного переноса (КДП)**, которое является математическим стержнем для большинства гидрогеологических моделей.

Методологический Инструментарий Моделирования

Для нахождения решений сложного уравнения КДП и прогнозирования поведения загрязнителей гидрогеологи используют несколько ключевых математических подходов. Эти методы традиционно делят на аналитические, численные и стохастические модели, каждый из которых имеет свои сильные стороны и методологические ограничения.

Аналитические Модели

Аналитические решения представляют собой строгие математические формулы, дающие точный ответ, но их можно получить только для сильно упрощенных, почти идеализированных условий. Это, например, одномерный перенос, среда, абсолютно однородная по своим свойствам, постоянная скорость потока и точечный источник загрязнения, возникающий одномоментно. Главные преимущества этих моделей — скорость вычислений и полное отсутствие вычислительной погрешности, что позволяет быстро оценить, насколько система чувствительна к изменению параметров. Они отлично подходят для быстрого, предварительного скрининга и оценки рисков.

Однако аналитические модели не способны учесть сложную, реальную геометрию водоносного горизонта, его выраженную природную гетерогенность (изменчивость фильтрационных свойств) и нелинейные граничные условия, что в реальных инженерных проектах ограничивает их применение.

Численные Модели

Численные модели, основанные на Методе Конечных Разностей или Методе Конечных Элементов, решают уравнение КДП путем дискретизации — то есть разбиения исследуемой области на множество мелких ячеек или элементов. Этот подход позволяет преобразовать сложные дифференциальные уравнения в набор более простых алгебраических. Сегодня эти модели считаются наиболее мощным и распространенным инструментом в гидрогеологии. Они способны точно учитывать сложную геометрию, наличие гидрогеологических барьеров, высокую степень гетерогенности и даже моделировать нелинейные химические реакции и процессы распада. Программные комплексы, такие как MODFLOW (для потока) и MT3DMS или RT3D (для переноса), выступают в качестве общепризнанного промышленного стандарта. Главные сложности в работе с численными моделями заключаются в том, что они требуют обширного объема высококачественных исходных данных, их тяжело калибровать (настраивать параметры под фактические полевые данные), и они могут страдать от численной дисперсии — вычислительного артефакта, который искусственно размывает фронт загрязнения из-за ошибок в расчетной сетке.

Стохастические Модели

Эти модели призваны бороться с проблемой неопределенности и случайного характера распределения гидрогеологических параметров в пространстве, например, с тем, что коэффициент фильтрации не является фиксированной величиной. Стохастические модели рассматривают эти параметры не как постоянные, а как случайные поля, подчиняющиеся определенным статистическим законам. Такие методы, как метод Монте-Карло, позволяют рассчитать не просто факт загрязнения, а вероятностный риск его возникновения. Они отвечают на вопрос: "Какова вероятность того, что концентрация превысит допустимый уровень в этой конкретной точке?". Это делает их незаменимыми для объективной оценки рисков и принятия решений в тех случаях, когда полевые данные скудны или обладают высокой степенью неопределенности.

Практическое Применение и Экологическая Защита

Результаты математического моделирования имеют прямую, высокую практическую ценность и выступают неотъемлемой частью всех процедур экологической экспертизы и проектирования.

Прогнозирование Зоны Загрязнения и Времени Прорыва

Моделирование позволяет нам надежно спрогнозировать форму и концентрационное ядро загрязнения — так называемый плюм или факел — на любой заданный период, будь то 5, 10 или даже 50 лет. Эта способность позволяет заранее определить, какие водозаборы, населенные пункты или чувствительные природные экосистемы окажутся под угрозой. Кроме того, критически важной информацией является точный расчет времени прорыва загрязнителя до ближайшей питьевой скважины. Власти получают в свое распоряжение ценное время для разработки и реализации превентивных или восстановительных мер, которые нужно успеть применить до того, как произойдет катастрофа.

Обоснование Защитных и Восстановительных Мероприятий

Моделирование служит основным научным обоснованием для установления зон санитарной охраны (ЗСО) вокруг стратегически важных источников водоснабжения. С помощью моделей можно точно рассчитать границы первого, второго и третьего поясов ЗСО, гарантируя, что любая потенциальная угроза будет перехвачена до достижения скважины. Когда участок уже загрязнен, численные модели необходимы для оптимизации сложных систем очистки, таких как "pump-and-treat" (откачка и очистка). Моделирование помогает найти оптимальное расположение и необходимую производительность откачных скважин, чтобы максимально быстро и эффективно перехватить основную массу загрязнителя, тем самым снижая общие затраты на рекультивацию.

Оценка Экологических Рисков и Регулирование

Моделирование дает возможность проводить детальный сценарный анализ. Можно оценить, например, как повлияет падение уровня грунтовых вод (из-за засухи) на направление потока загрязнения или каковы будут последствия крупной аварии на промышленном объекте. Такой анализ позволяет регулирующим органам объективно, количественно оценить экологический и экономический риск. На основании этих данных устанавливаются научно обоснованные, а не произвольные, нормативы сброса для промышленных предприятий. Точное моделирование, таким образом, переводит природоохранное регулирование из области субъективных суждений в область доказательных, измеряемых научных данных, повышая его эффективность.

Заключение

Математическое моделирование распространения загрязнителей в грунтовых водах сегодня является ключевым, высокотехнологичным и незаменимым элементом современной гидрогеологии и системы экологической защиты. Оно предоставляет надежный, прогностический фундамент для принятия всех стратегических решений, позволяя нам превратить сложные и невидимые природные явления в управляемые и предсказуемые параметры.

Будущее этого научного направления связано с неизбежным углублением **интеграции геоинформационных систем (ГИС)**, дальнейшим совершенствованием численных алгоритмов для борьбы с численными погрешностями и расширением применения стохастических методов для работы с неопределенностью геологической среды. В конечном счете, своевременное и точное моделирование является решающим фактором, который обеспечивает долгосрочную сохранность, защиту и устойчивое использование подземных водных ресурсов для благополучия общества.

Литература

1. Джамалов Р. Г., Зекцер И. С. Подземные воды и экология: основы гидрогеоэкологии. — Москва: Наука, 2012.
2. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Том 2. — Москва: МГГРУ, 2002.
3. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. — Москва: МГУ, 2015.
4. Орадовская А. Е., Шестаков В. М. Моделирование процессов в гидрогеологии. — Москва: МГУ, 1989.
5. Fetter C. W. Applied Hydrogeology. — Waveland Press, 2018.
6. Anderson M. P., Woessner W. W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. — Academic Press, 1992.
7. Zheng C., Bennett G. D. Applied Contaminant Transport Modeling. — Van Nostrand Reinhold, 1995.
8. Voss C. I., Provost A. M. SUTRA: A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport. — U.S. Geological Survey, 2002.