

Решение задач цифрового метода оптимизации мониторинга подземных вод на трансграничных территориях

И. Е. Дониц

Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II
ira22102000@gmail.com

Ю. А. Кораблев

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
juri.korablev@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассмотрены перспективы использования имитационного моделирования для мониторинга состояния подземных вод и программные продукты, применимые для этих целей. Проанализированы варианты внедрения цифровых технологий и имитационных моделей в сфере водоснабжения и мониторинга экологического состояния подземных вод. Выделены перспективные направления использования имитационных моделей подземных вод на трансграничных территориях.

Ключевые слова: подземные воды, ресурсный потенциал, трансграничная территория, MODFLOW

I. ВВЕДЕНИЕ

Каждый год население Земли увеличивается, и вместе с ним увеличиваются объемы потребляемых человечеством ресурсов, что делает задачу бережливого использования все более актуальной. Одним из самых распространенных, но при этом ограниченных ресурсов на Земле является чистая вода. По данным Всемирного банка и Росстата в цивилизованных странах, где ведется учет использования воды, суммарный объем потребления составляет 3,42 триллионов м³. Если рассматривать только запасы поверхностных вод, то это составляет примерно 0,7 % мировых запасов, из чего можно сделать вывод что уже через 100–150 лет на поверхности Земли может не остаться чистой воды. Учитывая, что вода является ресурсом, которому нет замены или альтернативы, его утрата может стать смертельной для человечества. Данная проблема рассматривается уже ни одно столетие, и человечество, помимо использования поверхностных пресных вод, также использует ледниковую воду, опресненные морские воды, а также подземные воды в регионах, где это возможно и экономически целесообразно. Однако с каждым годом данные ресурсы сокращаются и становятся все более дорогостоящими. Для сохранения ресурсного потенциала ужесточаются экологические требования для городов и производственных объектов, соответственно, все более востребованными становятся системы контроля состояния запасов воды, химического состава и объемов ее использования.

Это становится актуальным и с экономической точки зрения так как, например, на сегодня в странах Европы

стоимость 1 м³ в среднем составляет около 2–3 \$, а в некоторых странах доходит до 7–9 \$, учитывая средний расход на человека в год только за водоснабжение каждый житель Европы платит порядка 400–600 \$. Это без учета затрат воды на производство и сельское хозяйство, которые составляют еще 75 % используемой воды (25 % бытовое потребление).

Одним из основных источников, как было сказано выше, являются подземные воды, которые также имеют свои особенности, что делает некоторые их разновидности не подходящими для бытового, питьевого, промышленного или сельскохозяйственного использования.

На первом от поверхности уровне располагаются грунтовые воды, по сути своей они безнапорные и наиболее подвержены загрязнению от воздействий на поверхности. Данные воды подходят только для технического использования, однако являются условно чистыми, так как поверхностные воды и осадки, проходя через первый слой земной коры частично очищаются, используя почву как своеобразный фильтр (или загрязнитель в некоторых случаях).

Далее под первым водоупорным слоем и ниже располагаются уже артезианские водоносные горизонты. Глубина их залегания может составлять от 100 до 3000 м от поверхности, что делает их более защищенными от загрязнения, так как вода в них попадает не напрямую из почвы, а только в некоторых зонах питания Водоносного горизонта. В свою очередь, по количеству растворенных веществ подразделяются на минеральные и пресные воды. Минеральные воды в большинстве случаев используются для питьевого водоснабжения и бутилирования, а пресные также применяются для бытового водоснабжения, промышленности и сельского хозяйства

Скважины, используемые для доступа и мониторинга артезианских водоносных горизонтов, закладываются на срок от 40–50 лет, соответственно их расположение, дебит и функционал планируются заранее и проходят лицензирование [1].

Одним из методов расчета скважин, контроля и прогнозирования состояния, объемов водоотбора из водоносных горизонтов является метод имитационного моделирования.

Сегодня моделирование используется во многих отраслях, и водные ресурсы не являются исключением. Моделирование открывает множество возможностей прогнозирования, проведения расчетов и экспериментов без вреда для объекта, что является важным экологическим преимуществом.

Целью данной работы является анализ использования цифровых технологий в сфере подземного водопользования, применение программных продуктов для имитационного моделирования.

II. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СФЕРЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

С каждым днем цифровые технологии захватывают все больше сфер жизни человека. В сфере водопользования наиболее масштабным примером является проект *digital-water.city*, развернувшийся в таких городах как Берлин, Копенгаген, Милан, Париж и София [2].

Для Берлина реализованы такие цифровые решения, как:

- мобильное приложение, разработанное для управления активами питьевых скважин [3];
- мобильное приложения с использованием технологии дополненной реальности для визуализации подземных вод (объединяет 3D-геологическую модель района Берлина с моделированием потоков подземных вод и качества, чтобы погрузить пользователя в геологические недра);
- системы датчиков для отслеживания таких параметров, как уровень бактерий и наличие незаконных подключений к канализации, а также для контроля затопления и переполнения канализации в режиме реального времени;
- умная система очистки канализации с использованием беспроводной связи и компьютерного зрения.

В г. Копенгаген цифровизация в сфере водопользования заключается в программе для моделирования и прогнозирования нагрузки на канализацию и очистные сооружения, и принятие решений по оптимизации их работы, а также система управления ливневыми водами.

В Милане наибольшее внимание цифровых решений сосредоточено в сфере повторного использования воды и сельского хозяйства. Это такие технологии, как цифровая платформа *WebGis* для улучшения обмена городскими данными и их совместимости, система раннего предупреждения для безопасного повторного использования очищенных сточных вод в сельскохозяйственных целях, позволяющая предотвратить микробное или токсическое заражение. Также в сельском хозяйстве применяются беспилотные летательные аппараты (дроны) для отслеживания качества орошения, передающие данные в систему контроля орошения, отслеживающую безопасность воды. Интересной идеей является работа с населением и

стереотипами о повторном использовании воды путем использования игровых онлайн-платформ.

В Париже решения данного проекта применяются для обеспечения возможности безопасного купания в р. Сена и представлено в виде датчиков отслеживания бактерий и токсинов в воде, подключенных к системе раннего оповещения о качестве воды для купания.

В г. София реализованы решения, касающиеся уровня канализационных стоков, очистки канализации, представленные в Берлине.

Что касается применения цифровых технологий в России, на сегодняшний день оно не достигло такой массовости, как в европейских городах. Однако, некоторые элементы применения цифровых технологий в области природопользования распространяются в России и помогают в оценке запасов и их стоимости [4]. Одним из общедоступных примеров может служить онлайн платформа на базе ФГБУ «Гидроспецгеология». Она представляет собой интерактивную карту геологического мониторинга состояния недр [5]. На этой платформе можно отслеживать состояние самой сети мониторинга, состояние запасов, размер добычи и их гидродинамическое состояние. Также на базе Гидроспецгеологии создана система с открытым доступом по сбору и накоплению гидрогеологических данных по состоянию подземных вод в некоторых районах (в основном подземных вод, расположенных вблизи южной границы государства и на территории тектонической активности Камчатского края).

Используемые организациями платформы, не имеющие открытого доступа более обширны:

Умные счетчики воды: они позволяют автоматически считывать данные о расходе воды и передавать их в центральную систему мониторинга. Это помогает точнее определять расход воды, выявлять утечки и экономить ресурсы [6].

Системы мониторинга качества воды: использование цифровых технологий для контроля качества воды позволяет оперативно выявлять загрязнения и предотвращать возможные угрозы для здоровья населения [7].

Онлайн-платформы для управления водными ресурсами: создание специализированных интернет-платформ, где можно отслеживать данные о потреблении воды, услугах водоснабжения, а также получать актуальную информацию о состоянии водных систем.

Разработка геоинформационных систем (ГИС) для анализа и планирования использования водных ресурсов: такие системы позволяют в режиме реального времени отслеживать изменения в состоянии водных объектов, оценивать потребности и оптимизировать процессы водопользования.

Кроме того, организациями Росстата регулярно публикуются различные научные исследования с применением цифровых технологий в области экологии и природопользования [8].

Для подземных вод Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) и Госкорпорация «Росатом» разработали имитационные модели водоносных горизонтов, расположенных на территории АЭС, для отслеживания радиационного загрязнения и его распространения. На основе этих моделей спрогнозировано множество возможных сценариев загрязнения и противодействия им.

III. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Имитационное моделирование решает проблемы реального мира безопасно и разумно [m98]. Это удобный инструмент для анализа: он нагляден, прост для понимания и проверки. В разных областях бизнеса и науки имитационное моделирование помогает найти оптимальные решения и дает четкое представление о сложных системах [10, 11].

Говоря про модели подземных вод, созданные совместно с Росатомом, программная платформа была разработана именно под цели проектирования потоков подземных вод и распространения радиационных частиц, под это же и заведена математическая база модели.

Также во многих странах применяют имитационное моделирование для изучения подземных вод. Модели создаются целыми исследовательскими институтами, с использованием таких программ как:

- FEFLOW
- Visual MODFLOW Flex
- tNavigator

Все три платформы похожий функционал и позволяют моделировать динамические процессы и использовать 2D и 3D визуализацию.

Однако в России наибольшее распространение получили две последние программные платформы, и если говорить предметнее, то tNavigator относится больше к платформам, разработанным для моделирования нефтяных и газовых месторождений, а вот MODFLOW имеет более широкий функционал именно в гидрогеологии.

MODFLOW создана для моделирования движения подземных вод и загрязняющих веществ. Данное программное обеспечение обладает полным набором инструментов, необходимых для исследования качества воды, запасов подземных вод, а также для осуществления охраны водных ресурсов.

Разработка модели включает следующие этапы:

1. Схематизация. Корректное упрощение природных особенностей и факторов в пределах исследуемой территории.
2. Построение фильтрационной схемы. Внесение специальных карт и разрезов, отражающих основные параметры исследуемого объекта: размеры, конфигурации, значения снятых параметров, граничные условия, факторы прогноза и времени

3. Создание расчетной схемы. Определяется метод аналитических расчетов и способ построения.

Для создания модели необходимы фильтрационные параметры (коэффициент фильтрации, водопроницаемость, водоотдача и др.), дебиты водозаборов и нагнетательных скважин, инфильтрационное питание, поверхностный сток и пр.

Наиболее простым будет работать с разрезами и уровнями на 2D визуализаторе, поскольку для разработки трехмерной модели потребуется значительно больше исходных данных и соответственно большие вычислительные мощности. Это наиболее полное и легкое в использовании программное обеспечение для моделирования подземных вод, теплопереноса и движения загрязнений.

Еще одним преимуществом для России является интеграция с системами ГИС и привязка к ним, что позволяет легко подгружать карты местности для моделирования и использовать их в работе.

Таким образом, данная программа является мощным инструментом контроля и управления подземными водными ресурсами, что позволяет упрощать работу множества специалистов и может служить наглядным учебным пособием или объектом для научных исследований и экспериментов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водные ресурсы имеют критическое значение в разных сферах жизнедеятельности человека.

Питьевая вода: Вода – это основной ресурс, необходимый для поддержания жизнедеятельности человеческого организма.

Промышленность: Вода используется в промышленности для производства товаров, для охлаждения, очистки и других целей. Она является важным компонентом во всех отраслях, начиная от продуктов питания, химической и нефтяной промышленности до автомобилестроения, черной и цветной металлургии [12, 13].

Сельское хозяйство: Вода является жизненно важным ресурсом для сельского хозяйства. Она необходима для орошения полей, содержания скота, производства пищи и обеспечения продовольственной безопасности.

Энергетика: Вода используется для производства электроэнергии в гидроэлектростанциях, ТЭС, АЭС. Энергия воды широко применяется для освещения, обогрева, промышленности и других сфер.

Медицина: минеральные воды широко применяются для лечения и реабилитации, подбираются в зависимости от диагноза по составу и свойствам.

Туризм и отдых: Водные ресурсы привлекают туристов и используются для развлечений, спорта, купания, катания на лодках и прочих видов отдыха.

Экосистема: Водные ресурсы играют важную роль в экосистеме, обеспечивая жизнь как для растений, так и для животных. Они способствуют биоразнообразию и поддерживают здоровье окружающей среды.

Водные ресурсы планеты конечны и требуют бережного отношения, управления и постоянного контроля состояния. За счет повсеместного распространения и жизненной необходимости этот ресурс не относится к дорогим, но по своим свойствам и необходимости в большинстве случаев становится бесценным, особенно в условиях дефицита.

Применение современных цифровых технологий в данной сфере сегодня имеет очень слабый экономический эффект с точки зрения получения прибыли, однако необходимо для обеспечения контроля, сохранности и грамотного управления ресурсным потенциалом, и имеет в первую очередь стратегическое значение [14].

Применение имитационного моделирования на примере трансграничных вод сегодня позволит упростить работу инженеров гидрогеологов при лицензировании скважин и определения разрешенных объемов откачки [15]. А моделирование различных сценариев позволит спрогнозировать поведение объекта, определить зоны особого контроля для трансграничных объектов, идентифицировать зоны, требующие жёсткого контроля для предотвращения химических, бактерицидных или токсичных загрязнений, проникновение свалки, пестицидов, удобрений, дорожных солей [16].

В случае уже загрязнённых или истощенных водоносных горизонтов имитационная модель позволит разработать или оптимизировать решения для коррекции ситуации и спрогнозировать временной период восстановления.

Однако имитационное моделирование имеет еще и стратегические преимущества, такие как будущая интеграция модели с ГИС-системами, которые сегодня подвзяны к логистике и сбору экологических и инженерных данные (привязка к координатам, передача данных с приборов в реальном времени), и использования модели как базовой платформы для создания цифрового двойника месторождений пресных подземных вод [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Golovina E., Khloponina V., Tsiglianu P., Zhu R (2023). Organizational, Economic and Regulatory Aspects of Groundwater Resources Extraction by Individuals (Case of the Russian Federation). *Resources* 12: 89. doi: 10.3390/resources12080089
- [2] Stein U. et al. Making urban water management tangible for the public by means of digital solutions // *Sustainability*. 2023. T. 15. №. 2. С. 1280.
- [3] Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. *Water* 2023, 15, 2289. <https://doi.org/10.3390/w15122289>
- [4] Головина Е.И., Баярхуу Цэлмэг (2023) Стоимостная оценка как инструмент управления ресурсами пресных подземных вод в Российской Федерации. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. №4а, 81-91 doi: 10.20403/2078-0575-2023-4а-81-91
- [5] Головина Е.И., Гребнева А.В. (2022) Особенности управления ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Калининградской области). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. №4, С. 85-94 <https://doi:10.20403/2078-0575-2022-4-85-94>
- [6] A.V. Martirosyan, K.V. Martirosyan and A.B. Chernyshev, "Investigation of Popov's Lines' Limiting Position to Ensure the Process Control Systems' Absolute Stability," 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 69-72, doi: 10.1109/SCM58628.2023.10159089
- [7] K.V. Martirosyan, A.B. Chernyshev and A.V. Martirosyan, Application of Bayes Networks in the Design of the Information System "Mineral Water Deposit," 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 236-239, doi: 10.1109/SCM58628.2023.10159085
- [8] Afanasev P.M. Simulation of Liquid Fuel Spills Combustion Dynamics Based on Computational Fluid Dynamics Using Modern Application Programs // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. № 459 (2), 022034. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022034
- [9] Bazhin V.Yu., Masko O.N., Martynov S.A. Automatic burden balance monitoring and control in the production of metallurgical silicon // *Tsvetnye Metally* (2023) no 4, Pp. 53-60. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.07>
- [10] Potapov A.I., Kulchitskii A.A., Smorodinskii Y.G. et al. Evaluating the Error of a System for Monitoring the Geometry of Anode Posts in Electrolytic Cells with Self-Baking Anode. *Russ J Nondestruct Test* (2020) 56, 268–274. <https://doi.org/10.1134/S1061830920030080>
- [11] Yury I., Martirosyan A. The development of the soderberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system // *Sci Rep* 14, 3501 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52002-w>
- [12] Fetisov V., Ilyushin Y.V., Vasiliev G.G. et al. Development of the automated temperature control system of the main gas pipeline. *Sci Rep* 13, 3092 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29570-4>
- [13] Golovina E.I., Grebneva A.V. Management of groundwater resources in transboundary territories (on the example of the Russian Federation and the Republic of Estonia). // *Journal of Mining Institute*, 2021, 252(6), pp. 788–800. <https://doi.org/10.31897/PML2021.6.2>
- [14] Kulchitskiy A. Optical Inspection Systems for Axisymmetric Parts with Spatial 2D Resolution. // *Symmetry* (2021) 13, 1218. <https://doi.org/10.3390/sym13071218>
- [15] Asadulagi M.-A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V. Research on Hydrolithospheric Processes Using the Results of Groundwater Inflow Testing. // *Water* 2024, 16, 487. <https://doi.org/10.3390/w16030487>
- [16] Nguyen H.H., Bazhin V.Y. Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation. // *Metallurgist* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01487-3>
- [17] Martirosyan A.V., Kukharova T.V., Fedorov M.S. Research of the hydrogeological objects' connection peculiarities. *Proceedings of 2021 4th International Conference on Control in Technical Systems, CTS* 2021, 2021, pp. 34–38. <https://doi.org/10.1109/CTS53513.2021.9562910>