



АНАЛИЗ ОТКРЫТЫХ ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ТРЁХМЕРНОГО ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОДОНОСНЫХ СИСТЕМ

Турмуханов Нуркен Кажымуханович

Ташкентский университет информационных
 технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

E-mail: bobu7707@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20703152>

ARTICLE INFO

Received: 11th June 2026

Accepted: 13th June 2026

Online: 15th June 2026

KEYWORDS

открытое программное
 обеспечение, GemPy, FloPy,
 MODFLOW, PyVista, PyKrige,
 геологическое моделирование,
 водоносные горизонты,
 геостатистика, трёхмерная
 визуализация

ABSTRACT

В тезисе проведён сравнительный анализ открытых (open-source) программных решений для трёхмерного геометрического моделирования и визуализации подземных водоносных систем. Рассмотрены инструменты геостатистики (PyKrige, GeostatsPy), 3D-геологического моделирования (GemPy, LoopStructural), гидродинамического моделирования (FloPy/MODFLOW 6), визуализации (PyVista, VTK, ParaView) и работы с пространственными данными (GDAL, QGIS). Выявлены функциональные пробелы существующих решений, обосновывающие необходимость разработки специализированного программного комплекса.

Введение

Разработка программного комплекса для трёхмерного геометрического моделирования водоносных систем требует предварительного анализа существующих инструментов, позволяющего, с одной стороны, избежать «изобретения колеса» — использовать зрелые библиотеки там, где они закрывают задачу, — а с другой, выявить функциональные пробелы, обосновывающие необходимость собственной разработки [1, 2].

В настоящем анализе рассматриваются исключительно открытые (open-source) решения с активным сообществом разработчиков и актуальной документацией. Выбор открытого ПО обусловлен требованиями воспроизводимости научных результатов, отсутствием лицензионных ограничений для академических исследований и возможностью модификации исходного кода под специфические нужды задачи [3].

Классификация рассматриваемых инструментов

Открытые программные инструменты для трёхмерного гидрогеологического моделирования образуют иерархический стек, в котором каждый слой опирается на нижележащие библиотеки (рисунок 1). Такая архитектура позволяет разрабатываемому комплексу выборочно интегрировать отдельные слои, не воспроизводя уже решённые задачи.

Рисунок 1 — Стек открытых программных инструментов для трёхмерного гидрогеологического моделирования

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ	PyVista · VTK · ParaView · Three.js / WebGL
---------------------	---

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ	GemPy · LoopStructural · subsurface
ГЕОСТАТИСТИКА	GeostatsPy · PyKrigе · GSLIB · SciKit-GStat
ГИДРОДИНАМИКА	FloPy + MODFLOW 6 · OpenGeoSys · FEFLOW CE
ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДААННЫЕ	GDAL · Fiona · Shapely · Rasterio · QGIS
ОСНОВА	Python 3 · NumPy · SciPy · pandas · Jupyter

Инструменты геостатистики и пространственной интерполяции

PyKrigе — библиотека Python, реализующая обычный, простой, универсальный и индикаторный кригинг в двух- и трёхмерном пространстве. Интегрирована с NumPy/SciPy, поддерживает вариограммный анализ с подбором теоретической модели. Ограничение: не поддерживает ко-кригинг и стохастические симуляции (SGS/SIS) [4].

GeostatsPy — комплексная библиотека геостатистики, включающая Python-обёртку над GSLIB: последовательную гауссову симуляцию (SGSIM) и индикаторную симуляцию (SISIM). Обеспечивает построение ансамбля стохастических реализаций для оценки неопределённости модели. Ограничение: производительность ограничена CPU-вычислениями, без GPU-ускорения [5].

SciKit-GStat — современная библиотека вариограммного анализа с богатым набором теоретических моделей (сферическая, экспоненциальная, гауссова, матернова) и инструментами диагностики. Хорошо интегрирована с Jupyter Notebook для интерактивного исследования пространственной структуры данных [6].

Инструменты 3D-геологического моделирования

GemPy — открытая библиотека вероятностного 3D-геологического моделирования на основе метода потенциального поля (potential-field method). Использует PyTorch для автоматического дифференцирования и обеспечивает байесовскую оценку неопределённости геологической модели через интеграцию с PyMC3. Поддерживает построение многослойных моделей с разломами. Ограничение: высокие требования к памяти для крупных моделей; отсутствие специализированных инструментов для гидрогеологических атрибутов [7].

LoopStructural — библиотека структурного геологического моделирования, ориентированная на сложноустроенные складчато-разрывные системы. Реализует метод дискретного сглаживания (Discrete Smooth Interpolation, DSI) для построения поверхностей горизонтов с учётом структурных ограничений. Интегрируется с GemPy. Ограничение: ориентирована на рудную геологию, гидрогеологическая специфика не поддерживается [8].

subsurface — библиотека стандартизации форматов данных подповерхностного моделирования (Equinor). Обеспечивает единый формат хранения скважинных данных, поверхностей горизонтов и сеточных моделей, совместимый с GemPy, PyVista и промышленными форматами (RESQML, ECLIPSE). Ограничение: молодой проект с нестабильным API [9].

Гидродинамические симуляторы

FloPy + MODFLOW 6 — Python-интерфейс (FloPy) к гидродинамическому симулятору MODFLOW 6 (USGS). Де-факто стандарт моделирования фильтрации подземных вод. Поддерживает структурированные и неструктурированные сетки

(DISV), транспорт растворённых веществ (MT3D-USGS), переменную плотность (SEAWAT). FloPy обеспечивает полный Python-цикл: создание модели → запуск → постобработка результатов. Ограничение: MODFLOW работает на CPU, параллелизация ограничена [10].

OpenGeoSys (OGS) — открытый симулятор связанных термо-гидро-механо-химических процессов в пористых средах (Helmholtz Centre for Environmental Research). Поддерживает конечно-элементную дискретизацию на неструктурированных сетках, трёхфазную фильтрацию, реактивный транспорт. Python API (ogsbpy). Ограничение: высокий порог освоения, сложная настройка гидрогеологических задач [11].

Инструменты визуализации

PyVista — высокоуровневый Python API над VTK, обеспечивающий интерактивную 3D-визуализацию геологических моделей в Jupyter Notebook и настольных приложениях. Поддерживает полигональные сетки, воксельные объёмы, скалярные и векторные поля. Интегрирован с NumPy, FloPy и GemPy. Ограничение: ограниченные возможности управления шейдерами; нет инструментов для интерактивных геологических разрезов через GPU-геометрический шейдер [12].

ParaView — мощная платформа научной визуализации с поддержкой параллельного рендеринга и серверного режима (ParaView Server + веб-клиент). Поддерживает объёмный рендеринг, изоповерхности, анимацию временных рядов. Python-scripting через rvpython. Ограничение: сложный интерфейс, избыточен для встраивания в специализированное приложение [13].

Отсутствие сквозного рабочего процесса. Ни один из рассмотренных инструментов не обеспечивает полный цикл «скважинные данные → 3D-геологическая модель → гидродинамический расчёт → визуализация результатов» в единой среде. Пользователю приходится вручную передавать данные между PyKrige, GemPy, FloPy и PyVista, что создаёт риски потери информации и несогласованности форматов.

Ограниченность инструментов геологических разрезов. Ни PyVista, ни ParaView не поддерживают интерактивные произвольные геологические разрезы через программируемый GPU-конвейер: операция отсечения выполняется на CPU, что исключает отклик в реальном времени при перемещении плоскости разреза.

Отсутствие топологического контроля. GemPy и LoopStructural не проверяют топологическую корректность построенных тел: условие неотрицательности мощности горизонта ($h \geq 0$), замкнутость В-гер-оболочки, согласованность ориентации нормалей — остаются ответственностью пользователя.

Слабая интеграция геостатистики и 3D-моделирования. Инструменты геостатистики (PyKrige, GeostatsPy) работают с двумерными сетками или точечными 3D-данными, но не интегрированы непосредственно в рабочий процесс построения объёмных геологических тел с оценкой структурной неопределённости.

Выводы

Проведённый анализ открытых программных решений позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Экосистема открытого ПО для гидрогеологического моделирования достаточно зрела: задачи геостатистики (PyKrige, GeostatsPy), гидродинамики (FloPy/MODFLOW 6) и базовой визуализации (PyVista) решены на высоком уровне и могут быть интегрированы в разрабатываемый комплекс в качестве внешних зависимостей.

2. Выявлены три принципиальных функциональных пробела: отсутствие сквозного рабочего процесса, ограниченность интерактивных GPU-разрезов и недостаточность топологического контроля геологических тел. Именно эти пробелы определяют научную задачу и обосновывают разработку специализированного программного комплекса.

3. Архитектура разрабатываемого комплекса должна строиться по принципу интеграции существующих библиотек (FloPy, PyKrige, PyVista) через единый Python API, дополняя их собственными модулями для построения поверхностей, формирования замкнутых тел, топологического контроля и GPU-визуализации.

Список литературы:

1. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling. — 2nd ed. — Academic Press, 2015. — 564 p.
2. Mallet J.-L. Geomodeling. — Oxford University Press, 2002. — 599 p.
3. Stodden V., Leisch F., Peng R.D. Implementing Reproducible Research. — CRC Press, 2014. — 448 p.
4. Murphy B. et al. PyKrige: Kriging Toolkit for Python // Journal of Open Source Software. — 2021. — Vol. 6, No. 59. — P. 2878.
5. Pyrcz M.J., Jo H. GeostatsPy: Geostatistical Data Analytics Library // Journal of Open Source Software. — 2021. — Vol. 6, No. 63.
6. Mälicke M. SciKit-GStat 1.0: A SciPy-flavored geostatistical variogram estimation toolbox // Geoscientific Model Development. — 2022. — Vol. 15. — P. 2505–2532.
7. de la Varga M., Schaaf A., Wellmann F. GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion // Geoscientific Model Development. — 2019. — Vol. 12. — P. 1–32.
8. Grose L. et al. LoopStructural 1.0: time-aware geological modelling // Geoscientific Model Development. — 2021. — Vol. 14. — P. 3915–3937.
9. Equinor ASA. subsurface: Open-source library for subsurface data. — GitHub, 2023. [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/equinor/subsurface>
10. Bakker M. et al. Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy // Groundwater. — 2016. — Vol. 54, No. 5. — P. 733–739.
11. Bilke L. et al. Development of Open-Source Porous Media Simulators // Transport in Porous Media. — 2019. — Vol. 130. — P. 337–361.
12. Sullivan C., Kaszynski A. PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for VTK // Journal of Open Source Software. — 2019. — Vol. 4, No. 37. — P. 1450.
13. Ahrens J., Geveci B., Law C. ParaView: An End-User Tool for Large-Data Visualization // Visualization Handbook. — Elsevier, 2005. — P. 717–731.