

УДК 556.3:004.9

Корнилков Сергей Викторович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620219, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: kornilkov@igduran.ru

Рыбников Петр Андреевич

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией геоинформационных
и цифровых технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Рыбникова Людмила Сергеевна

доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник,
лаборатория экологии
горного производства,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: luserib@mail.ru

Смирнов Александр Юрьевич

научный сотрудник,
лаборатория геоинформационных и цифровых
технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: alexsm94@gmail.com

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ГИС-ОРИЕНТИРОВАННЫХ
БАЗ ДАННЫХ****Аннотация:*

Проблема хранения данных мониторинга состояния недр области влияния горнопромышленных предприятий имеет важное значение, поскольку эти данные используются для оперативного управления процессом добычи. Такие данные являются разнородными: накапливаются различные таблицы и каталоги, графические материалы в виде схем, карт, планов (как растровых, так и векторных). На примере мониторинга гидросферы горнопромышленной территории приведена методика хранения и обработки данных гидрогеологического мониторинга. В качестве основного подхода в реализации методики рассмотрены цифровые технологии. Системы управления базами данных выступают в качестве основного хранилища каталожных и табличных данных, а использование геоинформационных технологий позволяет задействовать в работе растровые и векторные данные. В статье описана методика взаимодействия геоинформационной системы и системы управления базами данных

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.107

Kornilkov Sergey V.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher,
Institute of Mining UB RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg,
e-mail: kornilkov@igduran.ru

Rybnikova Liudmila S.

Candidate of Geological
and Mineralogical Sciences,
Chief Researcher, Laboratory of mining ecology,
Institute of Mining UB RAS,
e-mail: luserib@mail.ru

Rybnikov Petr A.

Candidate of Geological
and Mineralogical Sciences,
Head of the Laboratory for geoinformation
and digital technologies in subsoil use,
Institute of Mining UB RAS,
e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Smirnov Alexander Y.

Junior Researcher,
Laboratory for geoinformation
and digital technologies in subsoil use,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: alexsm94@gmail.com

**METHOD OF DESIGNING
SPECIALISED HYDROGEOCHEMICAL
AND GIS-ORIENTED DATABASES***Abstract:*

The problem of storing data on the monitoring of the subsoil condition in the area of influence of mining enterprises is of great importance, since these data are used for the operational management of the mining process. Such data are heterogeneous: various tables and catalogs, graphic materials in the form of diagrams, maps, plans (both raster and vector) are accumulated. Using the example of monitoring the hydrosphere of a mining territory, a methodology for storing and processing hydrogeological monitoring data is given in the paper. Digital technologies are considered as the main approach to the implementation of the methodology. Database management systems (DBMS) act as the main repository of catalog and tabular data, and the use of geoinformation technologies allows you to use raster and vector data in the work. The article describes the methodology of interaction between a geographic information system (GIS) and a DBMS for storing, analyzing and interpreting data. Such interaction of software products allows you to receive predictive carto-

* * Работа выполнена при поддержке Государственного задания ИГД УрО РАН. Тема 2 (2025—2027 гг.) «Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр» (FUWE-2025-0002). Г.р. № 1022040300092-1-1.5.1.

для хранения, анализа и интерпретации данных.

Такое взаимодействие программных продуктов позволяет получать прогнозные картографические материалы в автоматизированном виде. Для создания системы управления базами данных апробировано специализированное программное обеспечение *Hydro GeoAnalyst*. Установлено, что подход по совместному использованию системы управления базами данных и геоинформационной системы позволяет получать количественные и качественные прогнозные оценки за счет оптимизации алгоритма взаимодействия с данными и снижения трудозатрат пользователя.

Ключевые слова: геоинформационная система, системы управления базами данных, QGIS, *Hydro GeoAnalyst*, реляционные базы данных, массивы данных, пространственно-распределенные данные, гидрогеохимия, горное дело.

graphic materials in an automated form. To create a DBMS, specialized software *Hydro GeoAnalyst* was tested. It has been established that the approach of joint use of DBMS and GIS allows obtaining quantitative and qualitative forecast estimates by optimizing the algorithm for interaction with data and reducing user labor costs.

Key words: GIS, DBMS, QGIS, *Hydro GeoAnalyst*, relational databases, data arrays, spatially distributed data, hydrogeochemistry, mining.

Введение

Работа горнопромышленного предприятия связана с накоплением большого объема данных мониторинга, необходимого для оперативного управления, стратегического планирования и оценки воздействия на окружающую среду. Одним из видов мониторинга является наблюдение за гидродинамическим и гидрогеохимическим состоянием подземных и поверхностных вод. Для этих целей создаются сети наблюдательных скважин и гидрометрических створов; осуществляется опробование подземных и поверхностных вод; выполняются опытно-фильтрационные работы и т.д.

В результате выполнения работ по мониторингу накапливается большой массив данных, часто разнородный по типу: каталоги и таблицы, описания и пояснительные записки, схемы и иллюстрации, чертежи и планы и т.п. При этом получаемые данные требуют обработки, обобщения и систематизации, поскольку именно на их основе выполняется качественная и количественная оценка состояния гидросферы в районе горнопромышленных объектов.

В эпоху активного внедрения и использования цифровых технологий для хранения, структуризации и систематизации вышеописанных массивов данных могут применяться системы управления базами данных (СУБД). Ключевой особенностью такого подхода (в отличие от простого хранения данных в виде цифровых скан-копий) является возможность последующей интеграции с геоинформационными системами (ГИС).

Целью исследования являлась разработка методики создания специализированных баз данных, позволяющая учесть разнородные данные комплексного воздействия горнодобывающих предприятий на гидросферу.

Для достижения поставленной цели исследования ставились следующие задачи:

- анализ и цифровизация данных гидродинамического и гидрохимического опробования;
- разработка структуры и наполнение базы данных пространственно-временной информацией (данные бурения, картирования, химических анализов и т.д.);
- создание ГИС-ориентированной базы данных для апробации методики автоматизированного построения картодиаграмм, разрезов скважин и т.д.

Реляционные модели данных и нормализация. Для понимания особенностей подготовки данных и структуры будущей базы данных (БД) необходимо уделить внимание базовым положениям из теории реляционных моделей данных [1].

Системой управления базами данных называется комплекс программно-языковых средств, позволяющих создавать базы данных и управлять данными посредством запросов.

Реляционные базы данных представляют собой базы данных, используемые для хранения и предоставления доступа к взаимосвязанным элементам информации (*таблицам*). Реляционные базы данных основаны на реляционной модели – способе представления данных, при котором данные хранятся в отдельных таблицах, а связь между элементами таблиц осуществляется с помощью первичных (*primary key*) и внешних (*foreign key*) ключей (рис. 1). В отличие от сетевых и иерархических баз данных, применение такого подхода позволяет масштабировать базу данных и распределять между несколькими сетевыми устройствами.

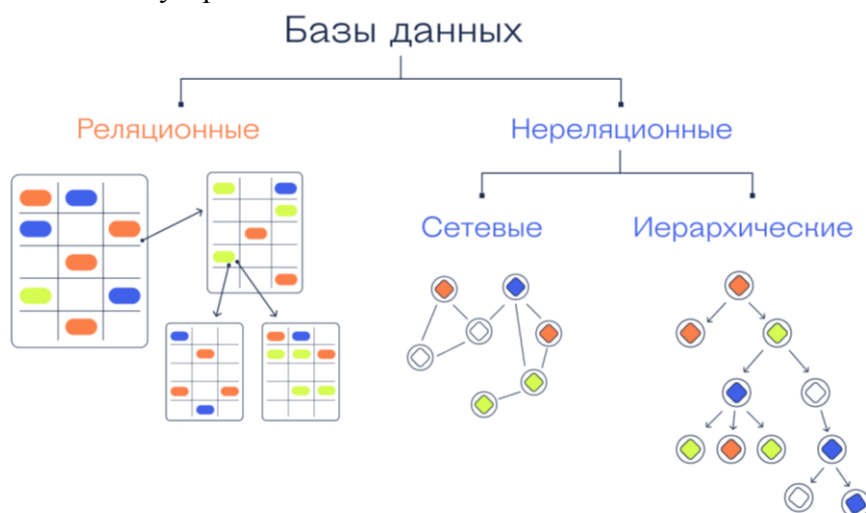


Рис. 1. Типы баз данных

Ключевыми и критическими элементами взаимосвязи таблиц между собой являются ключи: именно благодаря им отдельные таблицы становятся базой данных.

Первичный ключ (primary key) – в реляционной модели данных один из потенциальных ключей отношения, выбранный в качестве основного ключа (или ключа по умолчанию), т.е. идентификатора кортежа (множества пар «атрибут – значение атрибута»).

Внешний ключ (foreign key) – обеспечивает однозначную логическую связь между таблицами одной БД за счет связи «первичный ключ – внешний ключ».

При переходе к уровню проектирования базы данных необходимо понимать, каким образом можно смоделировать свойства объектов реальности, чтобы они были необходимы и достаточны и при этом не нарушали правил реляционных моделей данных. Для этого используются понятия сущности, атрибута и домена [2].

Сущность (entity) – описание какого-либо объекта. В базах данных под сущностью обычно подразумевают таблицу. Исходят из правила, что одна таблица – одно исчерпывающее описание свойств объекта – одна сущность.

Атрибут (attribute) – признак, который описывает этот объект. Обычно под атрибутами принято понимать заголовки столбцов в таблице.

Домен (domain) – набор всевозможных допустимых значений какого-то объекта. Иными словами, это тип данных и параметров, допустимых для хранения в атрибуте.

На первом этапе проектирования структуры СУБД определяются типы данных, их количественные и качественные показатели (включая специфические особенности), реальная и потенциальная взаимосвязь между данными. Тем самым определяется количество используемых таблиц и их структура – схема базы данных (*database schema*). Следующим этапом выполняют нормализацию структуры СУБД [3].

Нормализация в теории реляционных баз данных – это процесс организации данных в СУБД, определения взаимоотношения данных друг с другом и их упорядочивания. Нормализация включает в себя создание таблиц и установление связей между ними в соответствии с правилами, разрабатываемыми как для защиты целостности данных, так и для повышения гибкости СУБД, устраняя избыточность и несогласованную зависимость [4].

Очевидно, что по мере наполнения СУБД новыми данными размер базы данных будет увеличиваться. Нормализация данных позволяет добиться следующих эффектов:

1. Уменьшает объем базы данных. За счет отдельных таблиц для категорий и повторяющихся элементов можно уменьшить размер записей в базе данных, а значит, и ее вес.

2. Упрощает поиск. Нормализованную базу данных, которая состоит из связанных таблиц, можно оптимизировать для задач без дополнительных действий. Например, для поиска по заданной категории не придется искать и перебирать уникальные элементы. Для этого можно обратиться к отдельной таблице с категориями и быстрее найти нужные данные.

3. Уменьшает вероятность ошибок и аномалий. Нормальные формы данных в таблицах взаимосвязаны. Например, если нужно изменить или удалить данные в одной таблице, то остальные связанные с ней данные автоматически обновятся: не придется перебирать все записи в поисках полей, которые нужно изменить или удалить, а значит, не будет ошибок, когда в базу внесут изменения.

В теории реляционных моделей данных выделяют 7 уровней нормализации данных:

- первая нормальная форма (1НФ);
- вторая нормальная форма (2НФ);
- третья нормальная форма (3НФ);
- нормальная форма Бойса-Кодда (НФБК);
- четвертая нормальная форма (4НФ);
- пятая нормальная форма (5НФ);
- шестая нормальная форма (6НФ).

При этом необходимым и достаточным считается достижение третьей нормальной формы (3НФ), поскольку в некоторых случаях попытка нормализовать данные до «идеального» состояния приводит к созданию множества таблиц, содержащих исключительно ключи и связи. Это усложняет работу с данными: они становятся «нечитаемыми» для пользователя, и также может снизиться производительность СУБД [5].

Приведение данных к нормальным формам выполняется последовательно: для достижения 3НФ необходимо сначала выполнить нормализацию до 1НФ и 2НФ. Кратко рассмотрим, что представляют собой первые три нормальные формы.

Первая нормальная форма (1НФ): в базе данных не должно быть дубликатов и составных данных. Например, если в базе данных имя исполнителя хранится в виде атрибута «ФИО» и записи «Иванов Иван Иванович», то такой атрибут и запись необходимо разбить на три отдельных, соответственно. Необходимость такого «дробления» до базовых элементов связана с тем, что операции запросов (SELECT) и фильтрации в денормализованной базе данных становятся значительно дороже с точки зрения вычислительных ресурсов по сравнению с запросами к нормализованным связанным таблицам [5]. Это связано с необходимостью выполнения более сложных операций (вложенных логических функций), увеличенной частотой сканирования таблиц, повышенной нагрузкой на процессор и память, а также неэффективным использованием индексов.

Вторая нормальная форма (2НФ): у каждой записи в базе данных должен быть первичный ключ. Первичный ключ – это элемент записи, который не повторяется в других записях (уникальный идентификатор – id). При попытке запроса к таблице, у

которой у каждой из записей отсутствуют уникальные значения *id* может возникнуть неоднозначная ситуация, когда запросу будет соответствовать сразу несколько записей.

Третья нормальная форма (3НФ): при выполнении 2НФ в записи не должно быть столбцов с неключевыми значениями, которые зависят от других неключевых значений. Чтобы понять данное правило можно рассмотреть в качестве примера табл. 1. Предположим, что в базе данных содержится таблица с записями о результатах гидрогеохимического опробования. В данном случае мы видим, что информация о глубинах скважины зависит исключительно от поля «номер скважины» и никак не зависит от ключевого поля «*id*»: глубина скважины является ее конструктивной характеристикой и не может измениться из-за повторного опробования. Таким образом, данная информация избыточна, и было бы достаточно использовать лишь идентификатор скважины (табл. 2), а характеристики скважины, зависящие от этого идентификатора, вынести в отдельную таблицу (табл. 3).

Таблица 1

**Пример таблицы базы данных гидрогеохимического опробования
наблюдательных скважин**

id	Дата	Номер скважины	Глубина скважины	Минерализация, мг/л
1	17.06.2025	1-Н	30 м	203
2	18.06.2025	2-Н	32 м	105
3	19.06.2025	1-Н	30 м	187
4	20.06.2025	3-Н	15 м	331
5	23.06.2025	4-Н	50 м	50

Таблица 2

**Таблица базы данных гидрогеохимического опробования
после применения 3НФ**

id	Дата	id скважины	Минерализация, мг/л
1	17.06.2025	1	203
2	18.06.2025	2	105
3	19.06.2025	1	187
4	20.06.2025	3	331
5	23.06.2025	4	50

Таблица 3

Таблица характеристик скважины

id скважины	Номер скважины	Глубина скважины
1	1-Н	30 м
2	2-Н	32 м
3	3-Н	15 м
4	4-Н	50 м

Зачастую приведение структуры таблицы в третью нормальную форму оказывается достаточным для работы с СУБД. Важно понимать, что в некоторых случаях 3НФ не используют для ускорения чтения данных, но такой подход обычно применяется в работе с большими хранилищами данных, где требуется быстрая построчная выдача записей [6].

Интеграция СУБД и ГИС. Теперь, когда подготовка структуры базы данных выполнена, можно переходить к ее непосредственному наполнению и использованию. Стоит учесть, что не каждый пользователь владеет языком структурированных запросов (SQL), поэтому целесообразно использовать визуальные инструменты для ввода и вывода данных.

В качестве блока ввода удобнее всего использовать табличные редакторы, такие как Microsoft Excel. Согласно определенной ранее схеме базы данных в таблицах Excel готовятся шаблоны с такими же полями атрибутов, после чего пользователь может в привычном для него виде заполнить соответствующие значения.

Таблицы Excel легко преобразовать в другие обменные форматы данных, на основе которых осуществляется импорт в СУБД. В качестве СУБД могут быть использованы как общеизвестные реляционные базы данных MySQL, PostgreSQL, MongoDB, Oracle и т.д., так и специализированные продукты. В качестве такого продукта может использоваться Hydro GeoAnalyst (рис. 2) – система управления экологическими и горно-геологическими данными, применяемая для хранения, анализа и управления массивом данных, накапливаемых в результате работы предприятия горнопромышленного профиля [7]. Hydro GeoAnalyst включает в себя настраиваемую структуру базы данных, инструменты обработки и интерпретации данных, статистического анализа, базовой визуализации географической информации, построения диаграмм и продольных профилей.

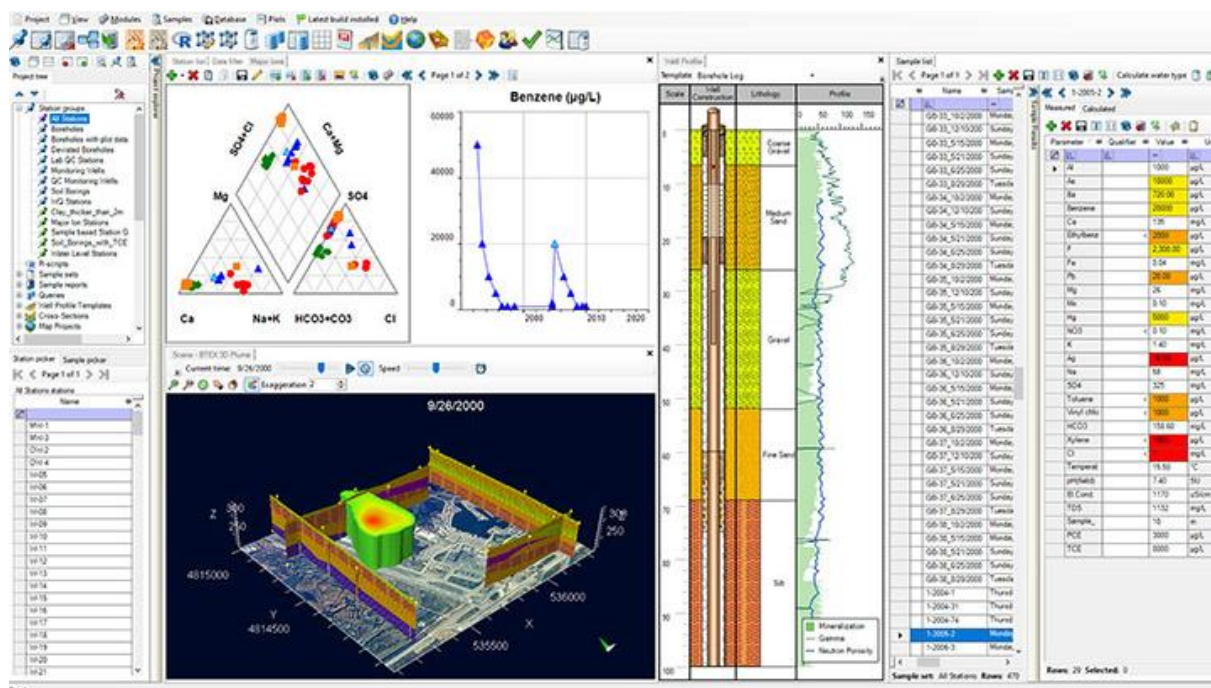


Рис. 2. Интерфейс программы Hydro GeoAnalyst [7]

Hydro GeoAnalyst представляет собой реляционную базу данных, поэтому проектирование структуры базы данных подчиняется вышеизложенным алгоритмам и методикам, применяемым для классических СУБД [8]. Однако, в отличие от простого хранения данных как в классических СУБД, в Hydro GeoAnalyst интегрированы инструменты обработки данных и их визуализации:

- Map Viewer – модуль визуализации пространственно-привязанных данных (аналогичный модулю, интегрированному в ModFlow Flex);
- Well Profile – модуль автоматического построения колонок скважин на основе внесенной в СУБД информации: литологии, конструкций скважины, уровней, геофизических наблюдений и т.д.;
- Cross Section Viewer – построение разрезов по створам в соответствии с внесенной в СУБД информацией.

В качестве системы проектирования схемы СУБД в данном ПО используется Template Manager (рис. 3), в котором посредством визуального интерфейса организована возможность задавать структуру таблиц и доменов.

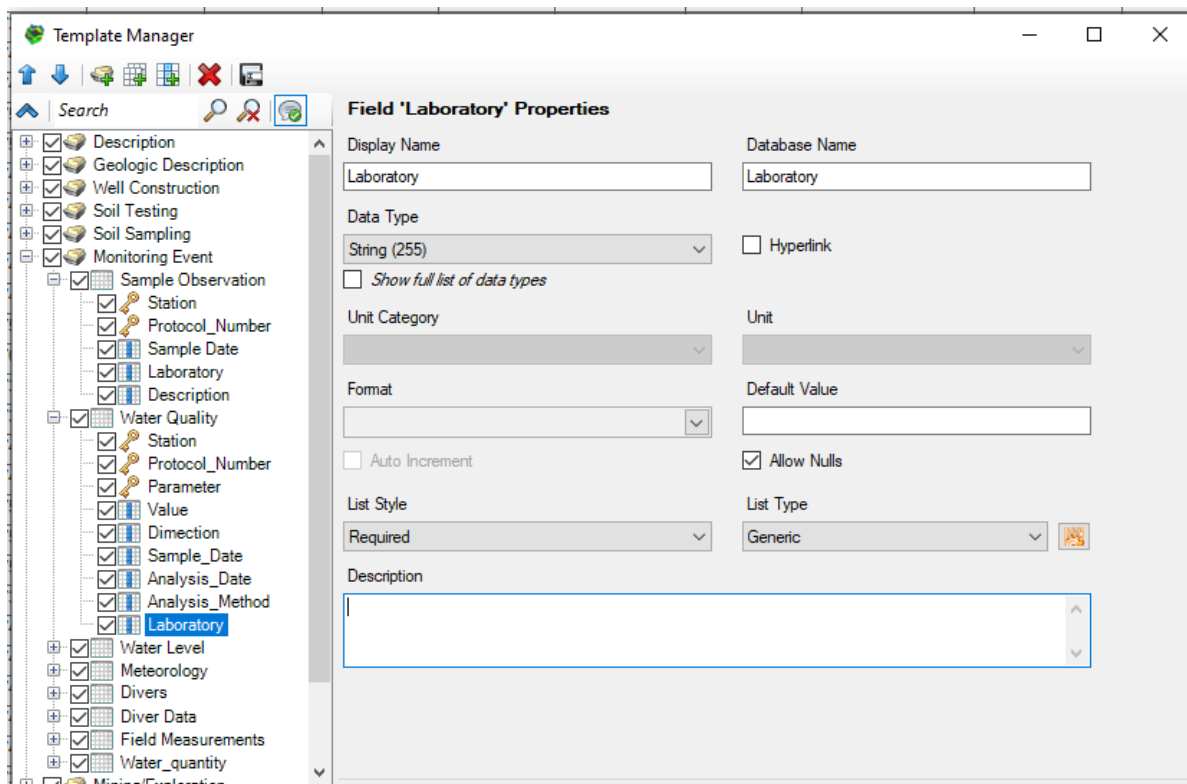


Рис. 3. Пример создания таблиц Sample Observation и Water Quality

Важно подчеркнуть, что GeoAnalyst (как и в случае классических СУБД) поддерживает применение более сложных схем реляционных связей, когда в смежных таблицах присутствуют несколько общих ключевых полей. В свою очередь, третья нормальная форма реализована посредством генетических списков (Genetic Lists) – каталогов в виде таблиц-классификаторов (рис. 4).

Item name	Description	Image	Include
AB	Амфиболовая п...		☒
AD	Андезит		☒
AE	Алевриты		☒
AF	Альбитофир		☒
AG	Аргилит		☒
AI	альбитовая пор...		☒
AK	Актинолит; акти...		☒
AL	Алунитовая руда		☒
ALB	Альбитизация; ...		☒
ALT	Алунитизация		☒
AM	Амфиболитизация		☒
AN	Ангидрит		☒
AND	Прохилки анги...		☒
ANG	Ангидритизация		☒
AP	Апатит; апатиз...		☒
AR	Африты		☒
AT	Актинолитовая ...		☒
AV	Алевриты		☒
BI	Биотит		☒
BR	Брекчия		☒
BRN	Борнит		☒
BRT	Брекчирование		☒
BS	Боксит		☒
BZ	Базальт		☒
CA	Кальцит		☒
CAL	Кальцитизация		☒
CB	Карбонатная по...		☒
CBL	Карбонатизация		☒
CH	Хлоритовая пор...		☒
CHD	Вкрапленность...		☒
CHL	Хлоритизация		☒
CO	Цеолизация		☒

Рис. 4. Пример генетического списка для кодирования пород и минералов

Когда база данных программы Hydro GeoAnalyst корректно заполнена, то становится возможным использование инструментов визуализации данных. Так, например, на рис. 5 приведен скриншот окна программы, на котором видны отметки положения уровней грунтовых вод по данным записей логгеров. Геологический разрез, характеристика вмещающих грунтов и конструкция скважины создаются автоматически на основе внесенных в СУБД данных.

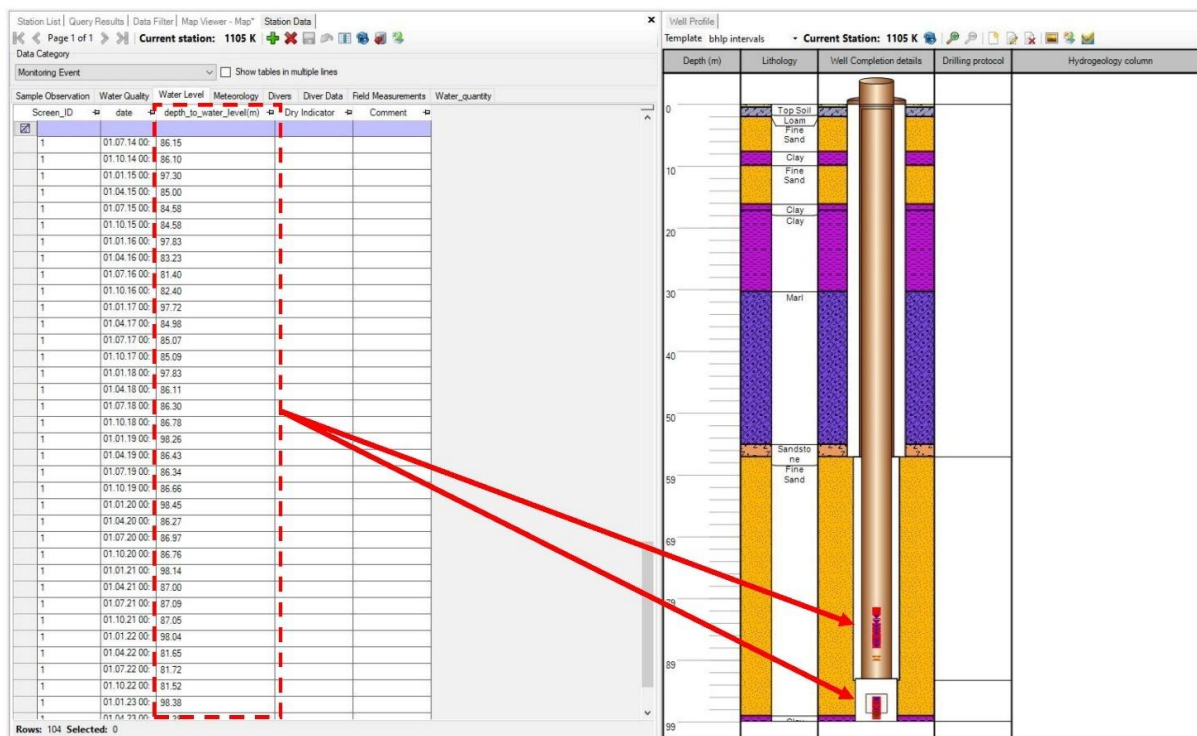


Рис. 5. Уровень грунтовых вод по данным логгера и визуализация конструкции скважины

Будет правильным отметить, что ключевой особенностью Hydro GeoAnalyst являются именно встроенные средства визуализации данных (которые можно реализовать и с помощью других модулей), тогда как принципы хранения и организации данных остаются аналогичными другим СУБД. Таким образом, в качестве базовой СУБД можно использовать любую бесплатную реляционную СУБД (например, PostgreSQL), а работу с данными реализовать посредством настройки подключений к такой БД внешних модулей.

Наиболее перспективным вариантом взаимодействия с данными является система СУБД + ГИС, поскольку это позволит хранить и обрабатывать еще и растровые и пространственно-координированные данные. При таком варианте взаимодействия визуализацию данных СУБД предлагается осуществлять с помощью подключения к PostgreSQL непосредственно из QGIS – бесплатной геоинформационной системы. В качестве инструментов визуализации будут использоваться стандартные модули QGIS и плагины из репозитория плагинов (построение точечных и линейных диаграмм, круговых диаграмм и проч.).

Применение PostgreSQL+QGIS позволяет использовать данное ПО на любых компьютерах. База данных может быть размещена на веб-сервере, а подключение к ней осуществляться непосредственно из QGIS, что позволяет обеспечить удаленную работу (из офиса, полевых условий и т.д.).

Автоматизированная визуализация данных СУБД в ГИС. QGIS, как и любая современная геоинформационная система, позволяет не только использовать в качестве слоев и таблиц локальные файлы, но и устанавливать подключения к СУБД, а также

картографическим веб-серверам WMS, WFS, WCS [2].

Поскольку в базу данных предварительно была внесена полная информация (о координатах скважин, их конструкциях, характеристиках геологического разреза; датах и видах опробований и т.д.), ГИС, понимая заданную систему координат и проекцию, без труда размещает скважины на картографической подложке в виде точек (рис. 6). В свою очередь, другие встроенные инструменты визуализации интерпретируют массив данных химического анализа на заданную дату и в автоматизированном режиме строят круговые диаграммы анионно-катионного состава подземных вод. В качестве визуализации могут быть использованы и другие виды представления информации: диаграммы, графики и т.д.

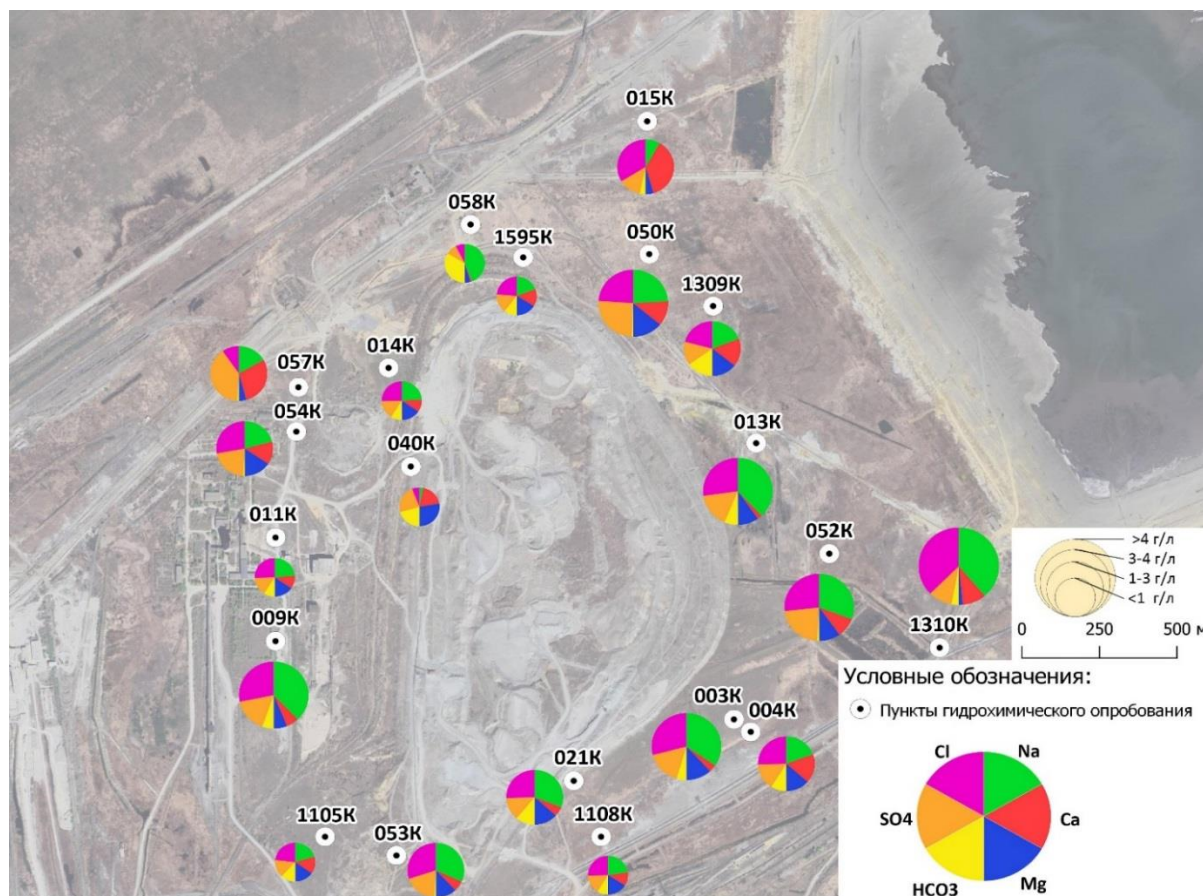


Рис. 6. Пример автоматизированной визуализации гидрогеохимических данных в виде круговых диаграмм в QGIS

При наличии других библиотек для визуализации данных (Leaflet, Mapbox, HighCharts и др.) работа с СУБД может быть организована и посредством использования web-картографии [9]. Но даже в этом случае ключевым аспектом, влияющим на качество анализа и прогнозов, является продуманная структура таблиц и доменов, а также достаточное наполнение СУБД необходимыми данными.

Заключение

Использование СУБД для хранения данных мониторинга состояния недр горно-промышленных территорий позволяет интегрировать такие данные в системы анализа и обработки данных, системы моделирования, прогнозирования и оперативного управления. Необходимость предварительной подготовки данных и структуры СУБД в свою очередь упорядочивает данные и приводит их в корректный для хранения вид. При этом ключевой особенностью подготовки исходных данных становятся требования по

выполнению правил из теории реляционных данных и нормализации данных до третьей нормальной формы.

Использование ГИС помимо СУБД позволяет задействовать в последующей работе картографические материалы: как растровые (сканы карт, схем, планов и т.д.), так и векторные (данные с приборов, облака точек, векторные чертежи и т.д.). При таком подходе не возникает утраты полезной, и зачастую критической картографической информации.

Общая методика подготовки и взаимодействия первичных данных представлена на блок-схеме (рис. 7). Основной блок обработки (выделен красным цветом) реализован в виде связки СУБД (PostgreSQL) и ГИС (QGIS), хотя для этих целей могут быть использованы и другие специализированные продукты (например, Hydro GeoAnalyst).

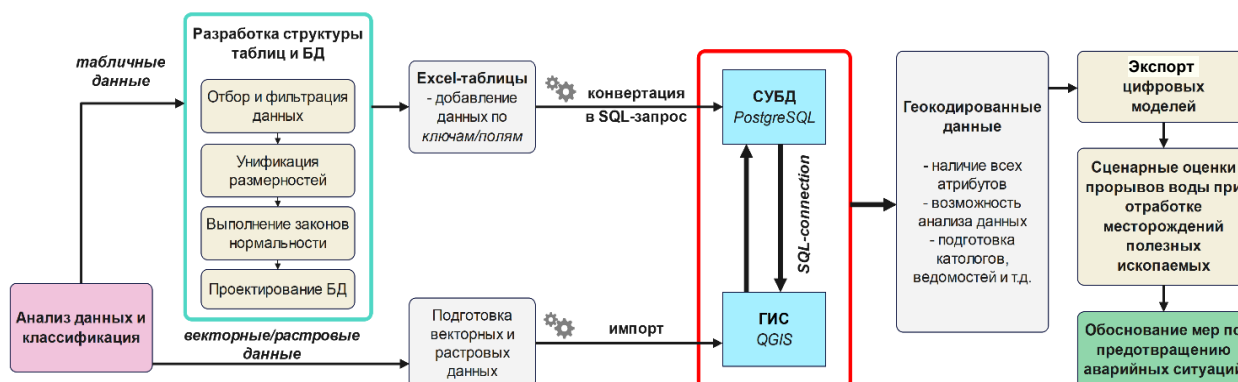


Рис. 7. Блок-схема методики создания ГИС-ориентированных баз данных и взаимодействия с ГИС

По результатам использования СУБД + ГИС появляется возможность представления исходных данных в геокодированном виде: можно визуально увидеть пространственное положение характерных точек и контуров, при этом получить доступ ко всей имеющейся атрибутивной информации, хранящейся в СУБД. Это, помимо простой визуализации (в виде карт, картодиаграмм, схем и проч.), позволяет создавать цифровые модели параметров на необходимый временной интервал в требуемом объеме. Такие цифровые модели (наборы данных) находят широкое применение в разработке сценарных прогнозов (в том числе в геофильтрационном и геомиграционном моделировании).

Сценарные оценки, благодаря возможности использования большого массива данных, позволяют выделить индикаторы защищенности горнопромышленных территорий – показателей, вносящих значительный вклад в развитие или минимизацию негативных процессов. Наличие карт ранжирования территорий позволяет в том числе классифицировать горнопромышленные ландшафты по степени защищенности гидросферы [10].

На основе классификации горнопромышленных ландшафтов становится возможным провести классификацию опасных гидрогеологических явлений при отработке в сложных горнотехнических условиях и выполнить обоснование мероприятий, направленных на снижение риска аварийных ситуаций. Таким образом, повышенные требования к исходным данным и качеству их хранения и обработки позволят получить достоверные и обоснованные прогнозные результаты.

Системность формирования специализированных систем управления базами данных и географических информационных систем заключается в интеграции данных, возможности хранения, отображения, обновления и анализа пространственной и атрибутивной информации. Это является важным этапом разработки стратегии освоения недр и позволяет решать задачи управления природосбережением [11].

Список литературы

1. Domdouzis K., Lake, P. 2021. Switzerland: Springer Cham, 400 p. DOI: 10.1007/978-3-030-42224-0
2. Jizhe Xia, Qunying Huang, Zhipeng Gui, Wei Tu, 2024. *Open GIS*. Switzerland: Springer Cham, 344 p. DOI: 10.1007/978-3-031-41748-1
3. Date C.J., 2019. *Database Design and Relational Theory*. Switzerland: Springer Cham, 451 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-5540-7
4. Joseph S.P. Fong, Kenneth Wong Ting Yan, 2021. *Information Systems Reengineering, Integration and Normalization*. Switzerland: Springer Cham, 384 p. DOI: 10.1007/978-3-030-79584-9
5. Li F., Zhou X., Cai P., Zhang R., Huang G., Liu X., 2025. *Database Development Milestones. Cloud Native Database*. Singapore: Springer, P. 1-21. DOI: 10.1007/978-981-97-4057-4_1
6. Selvaraj S., 2024. Advanced Database Techniques and Optimization. *Building Real-Time Marvels with Laravel*. USA, Berkeley: Apress, P. 425–453. DOI: 10.1007/978-1-4842-9789-6_17
7. *Hydro GeoAnalyst Environmental Data Management*. URL: <https://www.waterloohydrogeologic.com/products/hydro-geoanalyst> (дата обращения: 22.07.2025)
8. Волк В.К., 2022. *Базы данных. Проектирование, программирование, управление и администрирование*. Учебник для вузов, 3-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 244 с.
9. Корнилков С.В., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю., 2022. Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала. *Горная промышленность*, № S1, С. 127-133. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133
10. Корнилков С.В., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., 2025. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*, Т. 67, № 1, С. 76-85. DOI: 10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85
11. Яковлев В.Л., 2023. Обсуждение назревшей проблемы особенности современного периода исследований по проблемам комплексного освоения недр и развития минерально-сырьевой базы России. *Проблемы недропользования*, № 3(38), С. 21-34. DOI 10.25635/2313-1586.2023.03.021.

References

1. Domdouzis K., Lake, P. 2021. Switzerland: Springer Cham, 400 p. DOI: 10.1007/978-3-030-42224-0
2. Jizhe Xia, Qunying Huang, Zhipeng Gui, Wei Tu, 2024. *Open GIS*. Switzerland: Springer Cham, 344 p. DOI: 10.1007/978-3-031-41748-1
3. Date C.J., 2019. *Database Design and Relational Theory*. Switzerland: Springer Cham, 451 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-5540-7
4. Joseph S.P. Fong, Kenneth Wong Ting Yan, 2021. *Information Systems Reengineering, Integration and Normalization*. Switzerland: Springer Cham, 384 p. DOI: 10.1007/978-3-030-79584-9
5. Li F., Zhou X., Cai P., Zhang R., Huang G., Liu X., 2025. *Database Development Milestones. Cloud Native Database*. Singapore: Springer, P. 1-21. DOI: 10.1007/978-981-97-4057-4_1
6. Selvaraj S., 2024. Advanced Database Techniques and Optimization. *Building Real-Time Marvels with Laravel*. USA, Berkeley: Apress, P. 425–453. DOI: 10.1007/978-1-4842-9789-6_17

7. *Hydro GeoAnalyst Environmental Data Management*. URL: <https://www.waterloohydrogeologic.com/products/hydro-geoanalyst> (data obrashcheniya: 22.07.2025)
8. Volk V.K., 2022. Bazy dannykh. Proektirovanie, programmirovaniye, upravleniye i administrirovaniye [Databases. Design, programming, management and administration]. Uchebnyk dlya vuzov, 3-e izd., ster. Sankt-Peterburg: Lan', 244 p.
9. Kornilkov S.V., Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu., 2022. Geoinformatsionnyi monitoring dlya resheniya ekologicheskikh zadach gornopromyshlennykh territorii Srednego Urala [Geoinformation monitoring for solving environmental problems in mining areas of the Middle Urals]. *Gornaya promyshlennost'*, № S1, P. 127-133. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133
10. Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Rybnikova L.S., 2025. Ob osnovnykh napravleniyakh vzaimodopolneniya metodov tsifrovizatsii i geoinformatsionnogo obespecheniya gornogo proizvodstva [About the main directions of complementarity of methods of digitalization and geoinformation support of mining production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i raz-vedka*, Vol. 67, № 1, P. 76-85. DOI: 10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85
11. Yakovlev V.L., 2023. Obsuzhdeniye nazrevshei problemy osobennosti sovremennogo perioda issledovaniy po problemam kompleksnogo osvoeniya neдр i razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Rossii [Discussion of the urgent problem of the modern period of research on the problems of integrated development of mineral resources and the development of the mineral resource base of Russia]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3(38), P. 21-34. DOI 10.25635/2313-1586.2023.03.021.