

## ОБЗОР ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ БАЗ ДАННЫХ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ ИСПЫТАНИЯМ ГОРНЫХ ПОРОД

Д.В. Краюшкин<sup>1,2</sup>, П.А. Казначеев<sup>1</sup>, Д.Е. Белобородов<sup>1</sup>, А.В. Пономарев<sup>1</sup>, Г.С. Индаков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия,  
e-mail: Krayushkindenv@yandex.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Аннотация:** Лабораторные исследования горных пород включают в себя обработку большого объема разнородной информации. Увеличение количества экспериментов, измеряемых свойств и другой связанной информации требует использования современных подходов к организации хранения и извлечения данных как с точки зрения построения архитектуры модели данных, так и с точки зрения выбора современных инструментов для управления базой данных. В настоящей работе основное внимание уделяется текущему состоянию разработки базы данных и инструментов по работе с ними в области наук о Земле. Определено, что базы данных по образцам горных пород в науках о Земле можно разделить условно на два типа – с геологической информацией и с информацией по лабораторным испытаниям образцов. Литературный обзор показал, что на сегодняшний день имеется небольшое число публикаций о разработке систем управления баз данных по образцам горных пород, и в основном они описывают специфические узкие решения (например, веб-интерфейс набора данных по образцам минералов). Обсуждаются особенности этих специфических решений.

**Ключевые слова:** горные породы, база данных, большие данные, лабораторные эксперименты, разрушающие испытания, физика землетрясений, литературный обзор.

**Благодарность:** Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Исследования выполнены с привлечением оборудования Центра коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

**Для цитирования:** Краюшкин Д. В., Казначеев П. А., Белобородов Д. Е., Пономарев А. В., Индаков Г. С. Обзор подходов к построению баз данных по лабораторным испытаниям горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 152–169. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_4\_0\_152.

### Approaches to creation of data bases from lab-scale testing of rocks: Review

D.V. Krayushkin<sup>1,2</sup>, P.A. Kaznacheev<sup>1</sup>, D.E. Beloborodov<sup>1</sup>, A.V. Ponomarev<sup>1</sup>, G.S. Indakov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia, e-mail: Krayushkindenv@yandex.ru

<sup>2</sup> HSE University, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

---

**Abstract:** Lab-scale rock testing includes processing of a huge variety of information. The increase in the number of tests, measured properties and other related information requires advanced approaches to such data processing and storage in the context of both data model architecture and modern tools of data base control. This study focuses on the current situation in the area of development of a data base and processing tools in the Earth's sciences. The data bases on rock samples in the Earth's sciences can be conventionally divided into two types: geological information and lab-scale test data. The literature review shows that today there are only a few publications on the development of data bases from tests of rock samples and they mainly address specific and narrow-range solutions (for instance, a web-interface on acquisition of data on mineral samples). The features of these specific solutions are discussed in the article.

**Key words:** rocks, data base, Big Data, lab-scale experiments, destructive tests, earthquake physics, literature review.

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the state contract with the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. The research used equipment of the Share Use Center for Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism at the Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS.

**For citation:** Krayushkin D. V., Kaznacheev P. A., Beloborodov D. E., Ponomarev A. V., Indakov G. S. Approaches to creation of data bases from lab-scale testing of rocks: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):152-169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_4\_0\_152.

---

## Введение

При лабораторных исследованиях образцов горных пород возникает проблема организации структурированной базы данных (БД). Имеющиеся данные объемны и, как правило, разнородны — это идентификационные, массогабаритные, петрофизические данные, геологическая, минералогическая и петрографическая информация, фотографический материал, результаты и параметры испытаний. Необходимы корректная организация структуры БД, обеспечение связности между данными и реализация системы управления базой данных (СУБД). Структура БД должна позволять выделять как различные уровни данных, так и связи между ними, чтобы можно было отследить историю испытаний какого-либо образца.

Геологические, геомеханические и петрофизические данные являются основной информацией об образце, которая позволяет охарактеризовать горную по-

роду и обеспечивает понимание изменений в породе в процессе испытаний. Поэтому полное отражение этой информации в БД является важным условием ее качественного наполнения. Такую информацию можно разделить на первичные и вторичные данные. К первичным относятся идентификационные данные о типе и названии горной породы или минерала, происхождении, координатах места отбора, геологических особенностях, интервалах глубин отбора (для керна) и т.д.

Вторичные данные — это вся информация, полученная в результате измерений, анализов, испытаний и экспериментов. Например, это результаты изучения микроструктуры (оптическая и электронная микроскопия и пр.), состава (минералогические и химические анализы и т.п.), петрофизических и геомеханических свойств (пористость, проницаемость, прочность, скорости упругих волн и пр.). Для возможности проверки

и воспроизведения результатов важно иметь сопроводительные данные об использованной аппаратуре и расходных материалах. По каждому исследованию необходимы пояснения, отвечающие на вопросы, как и с помощью чего определен данный параметр.

Для того чтобы коллектив исследователей мог эффективно использовать БД, необходимо обеспечить ее доступность, относительную простоту, возможность самообучения. Кроме того, требуется выработать удобный алгоритм добавления новых данных, актуализацию текущей версии. Эти задачи определяют требования к СУБД. Для обеспечения безопасного хранения информации мы полагаем обязательным разработку эффективного механизма сохранения предыдущих версий.

Современное состояние в области организации управления данными характеризуется активным развитием как теоретических основ, так и средств практической реализации. Основной причиной является резкое возрастание объема данных («большие данные» — «Big Data») и степени их разнородности [1, 2].

На сегодняшний день особое внимание уделяется организации структур хранения данных не только с целью коммерческого использования, но и для исследовательских работ в различных областях науки и техники (см., например, [3]). Исследователи и ученые создают БД, на основе которых выявляют зависимости между данными, проводят их сравнение, агрегируют информацию с использованием различных инструментов аналитики. В геофизике и геологии широкое распространение получила регистрация БД не только характеристик горных пород [4], но и результатов проведенных с ними исследований и экспериментов [5], а также геофизических моделей и методов, использующих данные о породах.

БД формирует и обеспечивает структурированное хранение данных. Для управления данными используется СУБД, в задачи которой также входит ведение журнала изменений, обеспечение ограниченного доступа к данным, обеспечение их целостности, управление памятью и т.д. Пользовательские СУБД как конкретные программные реализации строятся на основе наборов базовых средств для СУБД, которые также можно назвать средами разработки СУБД. Обычно оба этих понятия — «пользовательская СУБД» и «среда разработки СУБД» — называют для краткости просто «СУБД»; мы далее тоже придерживаемся такой терминологии.

Одними из наиболее высокопроизводительных, популярных и активно поддерживаемых СУБД являются Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, Redis (в соответствии с рейтингом DB-Engines Ranking. URL: <https://db-engines.com/en/ranking>). Среди всего многообразия СУБД можно выделить некоторые отличия каждой из них в таких параметрах, как тип реализуемой БД, специфика (область) применения, тип доступа к коду (лицензия, open-source) и др. Например, СУБД Redis работает с БД типа «ключ-значение», что увеличивает ее быстродействие и применяется в задачах потоковой обработки данных. PostgreSQL является проектом со свободным исходным кодом, поддерживает пользовательские типы данных и не ограничивает размер БД. Microsoft SQL Server рассчитана на работу с БД разного размера, от однопользовательских на локальном компьютере до многопользовательских серверных БД, и интегрируется с другими продуктами Microsoft. MySQL распространяется как под свободной лицензией GNU GPL, так и под коммерческой лицензией. Oracle Database поддерживает различные типы БД, разные варианты хранения данных и рас-

положения сервера, различные типы доступа.

Для удобства разработки и администрирования БД существуют приложения с пользовательским интерфейсом, такие как SQL Server Management Studio, DataGrip (JetBrains), DBeaver, phpPgAdmin (PostgreSQL), phpMyAdmin (MySQL, mariaDB). По сравнению с классическим консольным представлением, такие приложения позволяют более удобно управлять данными, устанавливать уровни доступа к ним, настраивать параметры подключения к БД, строить структурные схемы зависимостей таблиц (сущностей) и т.д. Стоит отметить, что существуют СУБД, такие как Microsoft Access и LibreOffice Base, которые объединяют СУБД и приложение пользовательского интерфейса (в англоязычной литературе «database management system» и «front-end user interfaces» соответственно), что снижает порог входа для использования СУБД и упрощает поддержание работоспособности. С другой стороны, такие «монолитные» решения хуже масштабируются и имеют недостатки при работе с большим количеством данных. Поэтому их удобнее всего использовать на начальном этапе разработке БД, когда объем данных еще невелик. При особой специфике отображения и управления данными могут быть дополнительно разработаны собственные или использованы сторонние программные средства, сетевые или локальные приложения.

### **Особенности организации и типы баз данных в науках о Земле**

В науках о Земле тоже возникает задача организации БД больших объемов, особенно в геологических, геофизических, геомеханических, геоинформационных приложениях. Такие БД, особенно в геологических приложениях, как правило, основываются на нескольких базовых принципах. Это географическая

привязка (расположение изучаемого объекта в координатном пространстве), масштабирование (приуроченность к геологической структуре разных рангов), тип информации (первичная, вторичная, словарная, рабочая).

Одна из главнейших особенностей геологической информации заключается в ее привязке к конкретным географическим координатам и глубине. Иными словами, каждому геологическому объекту (например, образцу породы) принадлежит своя локация. Локация может быть как точечной, так и площадной. Например, образец относится к точке отбора с определенными координатами, а результаты геохимического опробования — к изучаемой площади. Это обстоятельство (необходимая координатная привязка) накладывает обязательное условие указания местонахождения (с разной степенью подробности) при составлении БД.

Для полного изучения геологических процессов и явлений на разных масштабных уровнях необходимо применение принципа последовательных приближений [6]. При изучении более крупной структуры в ее пределах выделяют структуры меньшего порядка. Это позволяет в итоге вычлнить участки, наиболее перспективные для дальнейшего опробования. Составление БД в этом случае относится к геологическим структурам определенных порядков. «Проецировать» БД структур меньшего уровня на крупные структуры некорректно, но возможно обратное.

Сложность составления геологической БД заключается в ее специализации. Систематическая обработка больших и огромных массивов информации требует составления БД для определенных направлений использования. Например, решение промышленных поисковых задач требует привлечения информации по картированию и опробованию площа-

дей, а решение научно-исследовательских задач использует информацию, характеризующую тип вещества или геологического процесса.

БД в науках о Земле формируются по принципу целесообразности. «Рабочие» включают в себя необходимый и достаточный набор информации, позволяющий помочь получить необходимый исследователю результат. Особенностью «рабочих» БД является ограниченность доступа, использование узким кругом специалистов.

Другой тип — «словарные» БД. Их основной задачей является предоставление справочной информации геологического типа. Они призваны обеспечивать информацией широкий круг пользователей, в том числе незнакомых с геологией, например, школьников и студентов. Как правило, такие БД представлены в открытом доступе. Это может быть собранная систематизированная справочная информация по горным породам и минералам некоторой территории, например, «Минералы и горные породы России и СССР» (Описание минералов и горных пород России и стран бывшего СССР. Боголюбов А.С. Ассоциация «Экосистема». URL: <https://ecosystema.ru/08nature/min/index.htm>). На данном ресурсе информация представлена двумя частями в виде данных по минералам и по горным породам, систематизированным по типу и генезису. По схожему принципу представлен портал «Минералы и месторождения России и ближнего зарубежья» (Открытая систематизированная база информации о минералах и их месторождениях (местах находок) на территории России, Украины, Казахстана, стран Закавказья и Средней Азии (территория бывшего СССР). URL: <https://webmineral.ru>). В поисковой системе можно запросить данные как о минерале, так и о конкретном месторождении. Такой портал удобен прежде всего энту-

зиастам и коллекционерам, любителям камня.

Существуют и профессиональные «словарные» БД, например, «Открытая база данных минералов, горных пород, метеоритов и мест их происхождения» (Институт минералогии Гудзона. Открытая база данных минералов, горных пород, метеоритов и мест их происхождения. (ориг. The Hudson Institute of Mineralogy. Open database of minerals, rocks, meteorites and the localities they come from). URL: <https://www.mindat.org>). В ней приведена обширная информация по минералам, горным породам, месторождениям, метеоритам, локациям, статьям, словарным определениям и другим наименованиям геологических и планетологических данных.

БД можно разделить по степени изменчивости в процессе их использования, причем меняться могут как структура, так и данные. «Статические» БД характеризуются завершенностью и ограничениями по типам данных. Создание таких БД является конечной целью их разработчиков. Как правило, после выполнения своей функции они либо не развиваются, либо развиваются незначительно. Основная их функция заключается в обеспечении (насыщении) достаточной информацией при решении главной задачи.

Другой тип — «динамические» БД. Их создание продиктовано необходимостью постоянно дополнять информацию новыми данными, результатами опытов и операций над образцами. Такие БД используются для решения нескольких задач или циклов исследований, касающихся условной коллекции вещества (горных пород, минералов и т.п.). Развитие, изменение и пополнение БД происходит постоянно, поступательно, одновременно с накоплением свежей информации о проведенных экспериментах и обработанных результатах. Этот тип

БД позволяет отслеживать текущее состояние коллекции, все исследования, полностью или частично проведенные, статус каждого образца. В этом случае образец будет контролироваться на каждой стадии изменения вплоть до выбытия, например, вследствие разрушения. Такой подход позволяет накопить максимально полную информацию по конкретному материалу. «Динамические» БД теоретически являются долгоживущими, соотносимыми по времени с коллекциями образцов. Да и после освоения последнего образца такая БД не потеряет своей актуальности, но практически не сможет пополняться новыми первичными и вторичными данными. Важной особенностью разработки «динамической» БД является обязательная вовлеченность в ее поддержание всех исследователей, участвующих в получении данных для нее. Исследователи, как минимум, должны использовать БД для обеспечения целостности и непрерывности идентификационных данных по образцам.

Ряд публикаций посвящен развитию методических принципов организаций БД в науках о Земле [7, 8], где подчеркивается необходимость непрерывного усовершенствования средств работы с БД, в том числе за счет внедрения инструментов автоматизации, оптимизации и верификации данных.

При организации хранения информации необходимо создание модели данных, которая в первую очередь включает описание объектов хранения и их взаимосвязей [9]. При большом количестве объектов и взаимосвязей построение оптимальной архитектуры модели данных становится нетривиальной задачей. Например, рациональное хранение данных о горных породах должно включать в себя категоризацию и классификацию их свойств [10–12]. Кроме того, многие геологические и геофизические

задачи включают в себя дополнительно взаимосвязь информации о горных породах с данными лабораторных и полевых экспериментов или объединение нескольких больших хранилищ с разными моделями данных [13–15].

Результаты интеллектуальной деятельности по созданию БД, связанных с горными породами, активно регистрируются [16–18], что говорит о существенном практическом интересе к таким БД.

Известны работы, где исследователи не только решают архитектурную задачу связанного хранения данных, но реализуют собственные интерфейсы работы с пользователем, что позволяет проще обрабатывать и изучать хранимые данные [19], например, для оценки устойчивости в геотехнике [20–22]. В [20] геологической службой Норвегии были разработаны и введены в эксплуатацию БД и сервис отображения данных, которые содержат картирование неустойчивых горных склонов, где главной особенностью является обновляемая информация о зонах смещения.

При лабораторных исследованиях большого количества образцов горных пород возникает задача разработки соответствующей БД.

Общие требования к таким БД заключаются в следующем [23]:

- сокращение избыточности данных;
- возможность ограничения или расширения доступа;
- минимизация противоречивости данных;
- возможность поддержки транзакций;
- обеспечение целостности данных;
- организация защиты данных.

Специфические требования определяются объектами, которыми оперирует БД, т.е. образцами горных пород и результатами лабораторных испытаний различного типа.



## Модели и структура баз данных по образцам горных пород

Модель данных определяет структуру, управление и ограничения на работу с информацией в БД. Для описания данных на концептуальном и внешнем уровнях используются объектная модель данных (object-based) и модель данных на основе записей (record-based). В основе объектной модели лежит представление отдельного элемента (сущность) с набором свойств (атрибуты) и ассоциативной связью с другими элементами (связь). Объектно-ориентированная модель дополнительно определяет действия, которые связаны с сущностью.

В модели данных на основе записей информация хранится в виде записей определенного формата, которые внутри себя имеют поля разного по типу содержимого. Модели данных на основе записей подразделяются на реляционные (relational), иерархические (hierarchical) и сетевые (network). Последние две представляют из себя коллекции записей с зависимыми узлами. В иерархической модели данных каждая запись может иметь лишь одного родителя, в сетевой таких ограничений нет [23].

Существуют также БД типа NoSQL и NewSQL, информация в которых имеет специфичную структуру хранения. Модели данных в БД типа NoSQL включают в себя БД типа «ключ-значение», колоночные, документоориентированные БД, а также БД, где модель данных представлена в виде графов. БД типа NewSQL основываются на реляционной структуре хранения данных, и, хотя внутри себя такие БД могут использовать различные модели данных, пользователь взаимодействует с хранилищем на основе таблиц и их взаимосвязей [24, 25].

Исследователи, нацеленные на разработку новых подходов и обеспечение доступности геофизических данных, все чаще опираются на применение графо-

вых баз данных как единого источника информации, агрегирующего данные о различных объектах, в том числе не имеющих однозначной связи друг с другом. При этом важным для описания физического процесса в науках о Земле является мультидисциплинарность, т.е. его оценка с точки зрения нескольких областей. Например, в работе [1] рассматривается экспоненциальное увеличение количества сейсмостанций только сети IRIS-DMC на территории США и соответствующее увеличение объема накопленных сейсмических данных до 1000 ТБ. Это требует от исследователей разработки подходов, позволяющих масштабировать обработку данных, в зависимости от их суммарного объема и удельной плотности, на интересующий регион. Развитие первичных методов обработки, включая машинное обучение, в свою очередь, требует той или иной разметки этого гигантского объема данных, а использование в различных научных и прикладных целях требует привлечения не сейсмической информации — географической, геомеханической, климатической, информации об индустриальной активности и др., зачастую с интеграцией трехмерных статических и динамических моделей [26, 27].

Семантическая модель данных включает в себя объекты, свойства которых содержатся в различных каталогах множества геофизических служб, а взаимосвязь друг с другом описывается связью между узлами графа [26 — 28], причем хранение данных внутри объектов (несколько сущностей/таблиц) может быть организована в реляционном виде [28]. В этом случае БД демонстрирует более эффективное хранение больших данных, а также высокую скорость операций по различным критериям, путем использования алгоритмов обхода узлов графа. Таким образом, такой тип хранилища обладает гибкостью расширения.

Несмотря на то, что многие исследователи заняты поиском и разработкой новых эффективных подходов для организации хранения и извлечения данных в науках о Земле, они используют такой тип хранилищ как базовую часть (ядро) для построения более сложных моделей. В последнее время такой тип организации данных применяется в цифровых двойниках [29], где поведение системы моделируется на основе большого количества неструктурированных данных из различных источников, либо для поиска закономерностей и зависимостей для явлений, где их поиск является сложной исследовательской задачей [30]. Отдельно стоит отметить, что развитие центров коллективного пользования (ЦКП) научным оборудованием в последнее время существенно увеличивает объем данных аналитических исследований, испытаний и тестов [31]. Требуется разработка научных персонализированных (под ЦКП), удобных, доступных и относительно простых систем каталогизации, хранения и извлечения данных, альтернативных закрытым дорогим коммерческим сложным продуктам, включая СУБД и цифровые двойники, обладающим излишне широкими возможностями и заточенным под конкретно определенное промышленное назначение, не позволяющим анализировать и применять наработанные данные и модели для открытых исследовательских задач.

Реляционная модель, в отличие от нереляционной, требует конкретной структуры данных, называемой схемой. Она должна обеспечивать целостность и согласованность данных, в том числе с помощью гарантированных транзакций. Любой эксперимент предполагает возможность его повторения с набором заданных свойств, которые обязательно присутствуют от исследования к исследованию. Данные, полученные в экспериментах над горными породами, тре-

буют унифицированной модели данных (ядро БД), которая позволит строго структурированно их хранить и типизированно к ним обращаться. Использование ядра БД реляционного типа позволяет анализировать данные об экспериментах в структурированном виде и работать с ним в качестве единого источника информации. Дальнейшее «расширение» (увеличение числа типов данных), «распространение» (охват новых экспериментов, например, на другом оборудовании и т.п.) и развитие (увеличение возможностей для обработки данных) на основе ядра БД может осуществляться разными способами. Современные СУБД, в основе которых лежит реляционная модель данных, позволяют добавлять нереляционные свойства, которые дополнительно описывают объект исследования. Например, расширения для хранения геопространственных данных (растровые данные, данные геокодирования, пространственные функции, инструменты для интеграции QGIS, GeoServer, MapServer, ArcGIS, Tableau) или расширения для хранения данных в специальных форматах, таких как JSON, XML, YAML. Последнее может быть использовано для хранения вспомогательной неструктурированной или полуструктурированной информации. Стоит отметить, что быстрое действие запросов, которые включают такой тип данных, существенно ниже, чем строго реляционных СУБД.

Известны работы, в которых исследователи используют реляционную модель данных для однозначного определения свойств и представления связей между таблицами [10, 32 – 34]. Выбор такого типа БД связан с редко обновляемой структурой и отсутствием необходимости работы с большими данными. Кроме того, реляционная модель данных имеет простой и выработанный механизм портирования из одной СУБД в другую. Это позволяет объединить уси-



лия для разработки единого стандарта по хранению данных геофизических исследований широкого круга разработчиков, использующих различные инструменты для организации доступа к данным и их аналитике.

Для минимизации избыточности при сохранении максимально удобного поиска данные в такой БД представлены линейно (последовательно), в силу последовательного характера любых манипуляций с образцами (например, сначала образец горной породы выбурен из керна, потом определены его характеристики, затем он участвовал в эксперименте, после этого снова определены характеристики и т.д.).

По структуре содержащихся данных существующие БД по горным породам можно условно разделить на два варианта. В первом варианте это БД с акцентом на геологической информации, в которых прослеживается восходящая иерархия геологических элементов [10, 33] — образец породы соотносится с некоторой геологической единицей («unit», например, пирокластическим потоком), которая соотносится с геологическим объектом (например, вулканом) и т.д.

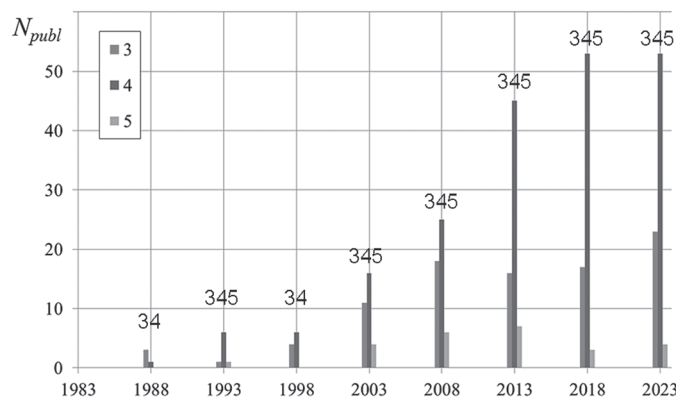
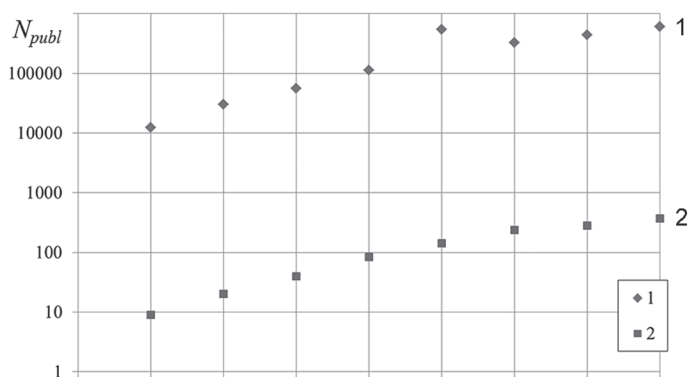
Кроме того, прослеживается нисходящая иерархия — образец характеризуется породой, которая состоит из минералов, а также иерархия по методам исследований. Каждый элемент иерархии характеризуется своим набором параметров (своей таблицей). Сама иерархия также представлена как таблица и является связующей сущностью для всех остальных элементов БД. Иерархия может быть введена также по геомеханическим, геофизическим и др. признакам, например, по элементам структуры месторождения добычи полезных ископаемых [19]. Данный подход близок к подходу в геоинформационных системах (в частности, создаваемых для инженерно-геологических или геологоразведоч-

ных задач [20]). Например, в [10] модель данных строится на основе геоиерархической структуры, причем взаимосвязь различных сущностей определяется некоторым набором вспомогательных таблиц, которые в том числе содержат различные уникальные идентификаторы для навигации по записям. Авторы отмечают, что этот блок можно рассматривать как основу БД, которая связывает все таблицы на основе «геородства».

Во втором варианте основной единицей БД является сам образец горной породы, который, как правило, участвует в лабораторных исследованиях, а все остальные данные (в том числе геологические) привязываются к нему. Такая структура используется для составления БД при обзорном анализе (метаанализе) данных множества различных исследований определенных свойств горных пород, например, при анализе моделей предсказания прочности [15], при разработке веб-приложений БД для агрегации данных по горным породам от разных лабораторий, при сведении воедино данных из разных экспедиций и т.п. [13, 34–36]. Данный подход позволяет соотнести результаты лабораторных исследований со свойствами определенной породы и близок к подходу в аналитических исследованиях (например, геохимических [12, 37, 38]). Например, наполнение модели данных из [34] таково, что структура БД ориентирована на образец.

Особняком по типу своей структуры выделяются классификационные БД, по существу, представляющие собой словарные БД (например, БД по классификации горных пород [17]). Их структура содержит минимальное количество таблиц и связей.

Обзор числа научных публикаций показывает, что доля публикаций, посвященных базам данных и связанных с образцами горных пород, от суммарного числа публикаций по теме баз данных остае-



ключевые слова:  
 1 – “database”  
 2 – “database rock sample”  
 3 – “database rock sample management”  
 4 – “development database rock sample”  
 5 – “relational database rock sample”

Распределение числа научных публикаций по пятилетним периодам согласно данным системы Semantic Scholar, с ключевыми словами

*Distribution of the number of scientific publications over five-year periods according to the Semantic Scholar, with keywords*

ся примерно постоянной за последние три десятилетия (рисунок). Число публикаций на рисунке приведено за пятилетние периоды и отнесено к последнему году периода. Оценка числа публикаций проведена по данным системы Semantic Scholar (<https://www.semantic-scholar.org/>), агрегирующей данные англоязычных публикаций в научных журналах и ориентированной в основном на тематику информационных технологий. Отбор публикаций производился по наличию поисковых слов, указанных в подзаголовке к рисунку, в названии, аннотации или ключевых словах статьи. Публикации отбирались с учетом возможной омонимичности (например, «rock» — горная порода или стиль музыки).

Более углубленный анализ показывает, что активно растет число публикаций, посвященных управлению и разработке баз данных, связанных с образцами горных пород. Упоминание реляционного характера баз данных, связанных с образцами горных пород, довольно редко. Это, по всей видимости, связано с более прикладным геофизическим характером публикаций и редким углубленным пояснением информационных основ обсуждаемых баз данных.

В таблице представлены ключевые особенности некоторых рассмотренных публикаций по БД, с указанием их типа: S — свидетельство о регистрации базы данных/программного обеспечения; P — научная статья/конференция.

**Сводная информация о рассмотренных опубликованных БД**

**Summary of published databases**

Источ-ник / Тип	Назначение БД	Наполнение БД	Средства построения СУБД	Примечание о структуре и модели данных
[10] / Р	Хранение информации о магматических породах в северной Неваде и восточной провинции Большого Бассейна (Great Basin Province) для анализа связей вулканических центров друг с другом, геофизическими аномалиями и месторождениями	Географическая информация с соблюдением иерархии геологических объектов, абсолютный и относительный возраст, химический состав, палеомагнитные свойства, результаты анализа рентгеновской дифракцией	SQL	Реляционная модель данных, иерархическая структура, совместимость с ГИС
[15] / Р	Построение моделей, прогнозирующих прочность при одноосном сжатии (UCS)	Литологическая классификация. Механические и физические параметры: твердость, определенная с помощью молотка Шмидта (SH) и по Шору, плотность, пористость, скорости продольной ( $V_p$ ) и поперечной ( $V_s$ ) волн, удельный вес, модуль Юнга (E), коэффициент Пуассона ( $\nu$ ), бразильская прочность при бразильском тесте (BTS), прочность при точечном нагружении (PLS)		Модель данных для прогноза прочности на основе дерева решений и линейной регрессии
[19] / Р	Хранение и извлечение информации о каменной соли для геологического моделирования, оценки устойчивости, экономической оценки при строительстве хранилищ газа	Геологические и географические данные, данные ГИС	SQL	Реляционная модель данных
[20] / Р	Хранение и предоставление информации о нестабильных скалистых склонах Норвегии	Атрибуты и сценарии схода нестабильных склонов; геологическое описание и параметры (объем, литология, скорость перемещения и т.д.); классификация опасности и риска; координаты полевых точек наблюдения, точек отбора проб, станций измерения смещения	Oracle	Реляционная модель данных. Совместимость с ГИС
[22] / Р	Хранение и предоставление информации о геометрических характеристиках горных пород для численного моделирования и экспериментальных ис-	Индексы формы геометрических образцов первого, второго и третьего порядков; координаты точек контуров, позиция фотокамеры		Модель данных для хранения контуров изображений образца

	следований макрокопических и микроскопических свойств			
[33] / P	Поиск малоизученных областей Каталонской вулканической зоны и анализ ее эволюции	Данные по пробам (координаты, геохимическая, геохронологическая информация, литология)	Excel	Иерархическая структура модели данных
[34] / P	Хранение и извлечение данных геомеханических испытаний (одноосное и трехосное сжатие, бразильский тест, прямой сдвиг)	Данные о породе, об отборе, параметрах и результатах испытаний, методах обработки данных, изображения	SQL	Реляционная модель данных, иерархическая структура
[35] / P	Предоставление информации о физических свойствах горных пород, имеющих значение для геотермальной разведки и характеристики резервуаров	Петрофизические, тепловые, геомеханические, электрические и магнитные свойства, хроностратиграфический возраст	SQL	Реляционная модель данных, иерархическая структура, метаданные для поиска
[36] / P	Хранение результатов исследований горных пород геотермальных полей Лос-Умерос и Акокулько (Мексика) для выявления статистических и причинно-следственных связей при разведке, глубокой оценке и моделировании резервуаров	Петрофизические, тепловые, фильтрационно-емкостные, минералогические, геомеханические, геохимические, магнитные и электрические свойства, скорости упругих волн. Результаты испытаний (точечное нагружение, одноосное и трехосное сжатие), флуоресцентных и РФА-анализов	Excel	Реляционная модель данных, метаданные для категоризации и быстрого поиска
[26], [28] / P	Предоставление информации из различных источников и форматов передачи и хранения данных	Гетерогенные данные (каталоги, службы, результаты исследований)	RKGS (RelationalAI)	Реляционная модель с описанием взаимосвязей на основе графа
[39], [40] / P, S	Хранение и предоставление геохимических и изотопных данных по горным породам. Объединяет результаты исследований различных научных групп в единой системе GeoRos и проекта DIGIS	Классификация горных пород/минералов, геологический возраст, координаты и высота отбора. Концентрации микроэлементов, отношения радиогенных и нерадиогенных изотопов. Метаданные включают аналитическую, геопространственную информацию, а также ссылки	PostgreSQL, MSSQL	Реляционная модель данных. Данные в формате ODM2, метаданные для категоризации и быстрого поиска
[5], [17] / S	1. Хранение и поиск результатов рентгеномографических исследований полноразмерных образцов горной породы.	1. Томографические изображения, информация о приборе и типе съемки, размеры образцов. Глубина отбора, влажность, плотность, пористость, консистенция	SQLite	

	2. Изучение физико-механических свойств техногенных грунтов и численное моделирование их устойчивости	образца, угол внутреннего трения, гранулометрический состав		
[4], [41], [42] / S	1. Описание результатов полевого отбора образцов Приморского разлома. 2. Хранение информации о горных породах Курильской островодужной системы, о. Сахалин и морфоструктур Охотского моря для интерпретации геофизических полей при изучении геологического строения. 3. Хранение результатов испытаний по разрушению мерзлых песчано-глинистых пород при одновременном воздействии водной среды и внешнего электрического поля	Петрофизическая и петрографическая информация, плотностные, упругие и магнитные характеристики; возрастная, вещественная и географическая привязка, температура, фотографии шлифов	Access, Excel	

### Заключение

При лабораторных исследованиях большого количества образцов горных пород возникает необходимость разработки соответствующей базы данных. Кроме требований, общих для большинства БД (минимальная избыточность, целостность, непротиворечивость и др.), возникают специфические требования, связанные с объектами, которыми оперирует разрабатываемая БД — образцами горных пород и результатами лабораторных испытаний различного типа.

Проведен обзор опубликованных работ по теме, определено, что в последние годы появляется много публикаций по организации БД в науках о Земле. Также по данной тематике регистрируются результаты интеллектуальной деятельности (программы для ЭВМ, базы данных, патенты). С другой стороны, имеется только небольшое число публикаций о разработке СУБД по образцам горных пород и в основном они описывают специфические узкие решения

(например, веб-интерфейс БД по образцам минералов).

Определено, что БД по образцам горных пород в науках о Земле можно разделить условно на два типа — БД с геологической информацией и БД с информацией по лабораторным испытаниям образцов.

В БД с геологической информацией образцы горных пород не являются самостоятельными объектами, а жестко привязаны к иерархии геологических элементов и, по сути, являются образцами — примерами соответствующей породы (материала из точки отбора), даже если с ними проводятся лабораторные измерения и испытания. В БД с информацией по лабораторным испытаниям образцов основной единицей является сам образец горной породы.

Обсуждаются особенности модели и структуры БД по образцам горных пород в лабораторных испытаниях. Показано, что задача создания такой БД является актуальной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arrowsmith S. J., Trugman D. T., MacCarthy J., Bergen K. J., Lumley D., Magnani M. B.* Big data seismology // *Reviews of Geophysics*. 2022, vol. 60, no. 2, article e2021RG000769. DOI: 10.1029/2021rg000769.
2. *Hariri R. H., Fredericks E. M., Bowers K. M.* Uncertainty in big data analytics: survey, opportunities, and challenges // *Journal of Big Data*. 2019, vol. 6, pp. 1–16. DOI: 10.1186/s40537-019-0206-3.
3. *Poudel M., Sarode R. P., Watanabe Y., Mozgovoy M., Bhalla S.* A survey of big data archives in time-domain astronomy // *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 12, article 6202. DOI: 10.3390/app12126202.
4. *Гридин Г. А., Остапчук А. А., Павлов Д. В., Григорьев А. В., Устинов С. А.* База данных РФ № 2023621889, 07.06.2023. Цифровой каталог образцов горных пород Приморского разлома. 2023.
5. *Корост С. Р., Приходько Е. А.* База данных РФ № 2023624197, 27.11.2023. База данных рентгенотомографических исследований полноразмерных образцов горной породы. 2023.
6. *Дудецкий В. Н.* Организация баз геологических данных. 2-е изд. — М.: Флинта, 2015. — 36 с.
7. *Константинов К. М., Забелин А. В., Константинов И. К., Яковлев А. А., Киргуев А. А.* Развитие петромагнитной базы данных Восточной Сибири / Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности: материалы Международной конференции. — Нерюнгри, 2015. — С. 87–94.
8. *Гизатуллин Р. З., Анищик В. В.* Базы данных как основа работы геологического направления // *ПРОнефть. Профессионально о нефти*. — 2017. — № 3(5). — С. 76–79.
9. *Новиков Б. А., Горшкова Е. А., Графеева Н. Г.* Основы технологий баз данных. 2-е изд. — М.: ДМК Пресс, 2020.
10. *Yager D. B., Hofstra A. H., Fifarek K., Webbers A.* Supplemental material: Development of an igneous rock database with geologic functions: Application to Neogene bimodal igneous rocks and mineral resources in the Great Basin // *Geosphere*. 2010, vol. 6, pp. 691–730. DOI: 10.1130/GES00516.1.
11. *McCormick T., Heaven R. E.* The British geological survey rock classification scheme, its representation as linked data, and a comparison with some other lithology vocabularies // *Applied Computing and Geosciences*. 2023, vol. 20, article 100140. DOI: 10.1016/j.acags.2023.100140.
12. *Hsu L., Mayorga E., Horsburgh J. S., Carter M., Lehnert K. A., Brantley S. L.* Enhancing interoperability and capabilities of Earth science data using the Observations Data Model 2 (ODM2) // *Data Science Journal*. 2017, vol. 16, no. 4, pp. 1–16. DOI: 10.5334/DSJ-2017-004.
13. *Lehnert K., Su Y., Langmuir C. H., Sarbas B., Nohl U.* A global geochemical database structure for rocks // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2000, vol. 1, article 1012. DOI: 10.1029/1999GC000026.
14. *Ma X., Ralph J. P., Zhang J., Que X., Prabhu A., Morrison S. M., Hazen R. M., Wyborn L., Lehnert K. A.* OpenMindat: Open and FAIR mineralogy data from the Mindat database // *Geoscience Data Journal*. 2023, vol. 11, no. 1, pp. 94–104. DOI: 10.1002/gdj3.204.
15. *Liu Z., Li D., Liu Y., Yang B., Zhang Z.* Prediction of uniaxial compressive strength of rock based on lithology using stacking models // *Rock Mechanics Bulletin*. 2023, vol. 2, no. 4. DOI: 10.1016/j.rockmb.2023.100081.
16. *Орлов Д. М., Коротеев Д. А., Муравлева Е. А.* Патент РФ № 2725506С, 02.07.2020. Способ и система оптимизации лабораторных исследований образцов горных пород. 2020. Бюл. № 19.
17. *Кондакова В. Н., Иванов П. В., Поспехов Г. Б.* База данных РФ № 2021622701, 26.11.2021. База данных физико-механических свойств техногенных грунтов. 2021.
18. *Панишев С. В., Миронов Я. В.* Программа для ЭВМ РФ № 2023614137, 27.02.2023. Программа расчета параметров бестранспортной технологии внутреннего отвалообразования смерзающихся вскрышных пород. 2023.
19. *Wang Y., Liu J., He X., Wang B.* Design and realization of rock salt gas storage database management system based on SQL Server // *Petroleum*. 2017, vol. 4, no. 4, pp. 466–472. DOI: 10.1016/J.PETLM.2017.10.001.
20. *Oppikofer T., Nordahl B., Bunkholt H. S., Nicolaisen M., Jarna A., Iversen S., Hermanns R. L., Böhme M., Molina F. X. Y.* Database and online map service on unstable rock slopes in Norway — From data perpetuation to public information // *Geomorphology*. 2015, vol. 249, pp. 69–81. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2015.08.005.
21. *Ficker T., Martisek D.* Database 3D surfaces for evaluation of Joint Rock Coefficients // *Procedia Engineering*. 2016, vol. 161, pp. 1361–1366. DOI: 10.1016/J.PROENG.2016.08.656.



22. Zhao L., Zhang S., Huang D., Wang X. A digitalized 2D particle database for statistical shape analysis and discrete modeling of rock aggregate // *Construction and Building Materials*. 2020, vol. 247, article 117906. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117906.
23. Connolly T., Begg C. *Database Systems. A practical approach to design, implementation, and management*. 3rd ed. Boston: Addison-Wesley, 2001, 1236 p.
24. Grolinger K., Higashino W. A., Tiwari A., Capretz M. A. Data management in cloud environments: NoSQL and NewSQL data stores // *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*. 2013, vol. 2, pp. 1–24. DOI: 10.1186/2192-113X-2-22.
25. Date C. J. *Database design and relational theory: Normal forms and all that jazz*. 2012. DOI: 10.1007/978-1-4842-5540-7.
26. Ma X. Knowledge graph construction and application in geosciences. A review // *Computers & Geosciences*. 2022, vol. 161, article 105082. DOI: 10.1016/j.cageo.2022.105082.
27. Wyborn L. A. I., Cox S. J. D., Klump J., Lehnert K. A. A modular approach to developing interdisciplinary, interoperable standards for geochemical data based on the Semantic Sensor Network (SSN) *Ontology*. 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.24898.22722.
28. Davis W., Hunt C. R. Knowledge graphs for seismic data and metadata // *Applied Computing and Geosciences*. 2024, vol. 21, article 100151. DOI: 10.1016/j.acags.2023.100151.
29. Catsoulis S., Singh J.-S., Narayanan C., Lakehal D. Integrating supervised learning and applied computational multi-fluid dynamics // *International Journal of Multiphase Flow*. 2022, vol. 157, no. 15, article 104221.
30. Zhao M., Xiao Z., Chen S., Fang L. DiTing: A large-scale Chinese seismic benchmark dataset for artificial intelligence in seismology // *Earthquake Science*. 2023, vol. 25, no. 2, pp. 84–94. DOI: 10.1016/j.eqs.2022.01.022.
31. Веселовский П. В., Дубиня Н. В., Пономарев А. В., Фокин И. В., Патонин А. В., Пасенко А. М., Фетисова А. М., Матвеев М. А., Афиногенова Н. А., Рудько Д. В., Чистякова А. В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2022. — Т. 13. — № 2. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0579.
32. Codd E. F. *The relational model for database management, Version 2*, Addison-Wesley; 1990, 567 p.
33. Muruzábal M. M., Geyer A., Aulinas M., Albert H., Vilà M., Micheo F., Bolós X., Pedrazzi D., Gisbert G., Planagumà L. CatVolc. A new database of geochemical and geochronological data of volcanic-related materials from the Catalan Volcanic Zone (Spain) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2024, vol. 446, article 107998. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107998.
34. Liolios P., Exadaktylos G. A relational rock mechanics database scheme with a hierarchical structure // *Computers and Geosciences*. 2011, vol. 37, pp. 1192–1204. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.02.014.
35. Bär K., Reinsch T., Bott J. The PetroPhysical Property Database (P3) – a global compilation of lab-measured rock properties // *Earth System Science Data*. 2020, vol. 12, pp. 2485–2515. DOI: 10.5194/essd-12-2485-2020, 2020.
36. Weydt L. M., Ramírez-Guzmán Á. A., Pola A., Lepillier B., Kummerow J., Mandrone G., Comina C., Deb P., Norini G., Gonzalez-Partida E., Avellán D. R., Macías J. L., Bär K., Sass I. Petrophysical and mechanical rock property database of the Los Humeros and Acozulco geothermal fields (Mexico) // *Earth System Science Data*. 2021, vol. 13, pp. 571–598. DOI: 10.5194/essd-13-571-2021.
37. Philippe D., Lassin A., Piantone P., Azaroual M., Jacquemet N., Fabbri A., Gaucher E. C. Thermodem. A geochemical database focused on low temperature water/rock interactions and waste materials // *Applied Geochemistry*. 2012, vol. 27, no. 10, pp. 2107–2116. DOI: 10.1016/J.APGEOCHEM.2012.06.002.
38. Horsburgh J., Audfenkampe A., Mayorga E., Lehnert K., Hsu L., Song L., Jones A., Damiano S., Tarboton D., Valentine D., Zaslavsky I., Whitenack T. Observations Data Model 2. A community information model for spatially discrete Earth observations // *Environmental Modelling, Software*. 2016, vol. 79, pp. 55–74. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.01.010.
39. Kallas L., Klöcking M., Sturm A., Sarbas B., Möller-McNett S., Geestmann M., Pestov P., Kurzawe D., Willbold M., Wörner G. Advancing FAIR Principles in Geochemistry: The GEOROC Database and DIGIS Initiative. Sektionstreffen Petrologie/Petrophysik und Geochemie, Karlsruhe. 2024. DMG. DOI: 10.5281/zenodo.11527479.
40. Klöcking M., Sturm A. DIGIS Data Model for GEOROC 2.0 (1.0.0) // *Zenodo*. Software. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10468217.
41. Валитов М. Г., Харченко Т. А., Терехов Е. П. База данных РФ № 2022622201, 06.09.2022. Физические свойства горных пород Курильской островодужной системы, острова Сахалин и некоторых морфоструктур Охотского моря. 2022.

42. Рочев В. Ф. База данных РФ № 2020621347, 04.08.2020. Данные лабораторных исследований дезинтеграции мерзлых грунтов при одновременном воздействии водной среды и магнитного поля на россыпных месторождениях золота в восточной части Амурской области. **ИДБ**

## REFERENCES

1. Arrowsmith S. J., Trugman D. T., MacCarthy J., Bergen K. J., Lumley D., Magnani M. B. Big data seismology. *Reviews of Geophysics*. 2022, vol. 60, no. 2, article e2021RG000769. DOI: 10.1029/2021rg000769.
2. Hariri R. H., Fredericks E. M., Bowers K. M. Uncertainty in big data analytics: survey, opportunities, and challenges. *Journal of Big Data*. 2019, vol. 6, pp. 1–16. DOI: 10.1186/s40537-019-0206-3.
3. Poudel M., Sarode R. P., Watanobe Y., Mozgovoy M., Bhalla S. A survey of big data archives in time-domain astronomy. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 12, article 6202. DOI: 10.3390/app12126202.
4. Gridin G. A., Ostapchuk A. A., Pavlov D. V., Grigoriev A. V., Ustinov S. A. Digital catalog of rock samples from the Primorsky Fault. *RU 2023621889 Database*, 07.06.2023. [In Russ].
5. Korost S. R., Prikhodko E. A. Database of X-ray tomographic studies of full-size rock samples. *RU 2023624197 Database*, 27.11.2023. [In Russ].
6. Dudetskiy V. N. *Organizatsiya baz geologicheskikh dannykh*. 2-e izd. [Organization of geological databases. 2nd ed.], Moscow, Flinta, 2015, 36 p.
7. Konstantinov K. M., Zabelin A. V., Konstantinov I. K., Yakovlev A. A., Kirguyev A. A. Development of the petromagnetic database of Eastern Siberia. *Geologo-geofizicheskaya sreda i raznoobraznye proyavleniya seysmichnosti: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Geological and geophysical environment and various manifestations of seismicity: proceedings of the International Conference], Neryungri, 2015, pp. 87–94. [In Russ].
8. Gizatullin R. Z., Anishchik V. V. Geological databases, as the basis for operation in geological direction. *PRONEFT. Professionally about Oil*. 2017, no. 3(5), pp. 76–79. [In Russ].
9. Novikov B. A., Gorshkova E. A., Grafeeva N. G. *Osnovy tekhnologiy baz dannykh*. 2-e izd. [Fundamentals of database technologies, 2nd ed.], Moscow, DMK Press, 2020.
10. Yager D. B., Hofstra A. H., Fifarek K., Webbers A. Supplemental material: Development of an igneous rock database with geologic functions: Application to Neogene bimodal igneous rocks and mineral resources in the Great Basin. *Geosphere*. 2010, vol. 6, pp. 691–730. DOI: 10.1130/GES00516.1.
11. McCormick T., Heaven R. E. The British geological survey rock classification scheme, its representation as linked data, and a comparison with some other lithology vocabularies. *Applied Computing and Geosciences*. 2023, vol. 20, article 100140. DOI: 10.1016/j.acags.2023.100140.
12. Hsu L., Mayorga E., Horsburgh J. S., Carter M., Lehnert K. A., Brantley S. L. Enhancing interoperability and capabilities of Earth science data using the Observations Data Model 2 (ODM2). *Data Science Journal*. 2017, vol. 16, no. 4, pp. 1–16. DOI: 10.5334/DSJ-2017-004.
13. Lehnert K., Su Y., Langmuir C. H., Sarbas B., Nohl U. A global geochemical database structure for rocks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2000, vol. 1, article 1012. DOI: 10.1029/1999GC000026.
14. Ma X., Ralph J. P., Zhang J., Que X., Prabhu A., Morrison S. M., Hazen R. M., Wyborn L., Lehnert K. A. OpenMindat: Open and FAIR mineralogy data from the Mindat database. *Geoscience Data Journal*. 2023, vol. 11, no. 1, pp. 94–104. DOI: 10.1002/gdj3.204.
15. Liu Z., Li D., Liu Y., Yang B., Zhang Z. Prediction of uniaxial compressive strength of rock based on lithology using stacking models. *Rock Mechanics Bulletin*. 2023, vol. 2, no. 4. DOI: 10.1016/j.rockmb.2023.100081.
16. Orlov D. M., Koroteev D. A., Muravleva E. A. *Patent RU 2725506C*, 02.07.2020. [In Russ].
17. Kondakova V. N., Ivanov P. V., Posphehov G. B. Database of physical and mechanical properties of technogenic soils. *RU 2021622701 Database*, 26.11.2021. [In Russ].
18. Panishev S. V., Mironov Ya. V. A program for calculating the parameters of transport-free technology for internal dumping of frozen overburden rocks. *RU 2023614137 Computer program*, 27.02.2023. [In Russ].
19. Wang Y., Liu J., He X., Wang B. Design and realization of rock salt gas storage database management system based on SQL Server. *Petroleum*. 2017, vol. 4, no. 4, pp. 466–472. DOI: 10.1016/J.PETLM.2017.10.001.
20. Oppikofer T., Nordahl B., Bunkholt H. S., Nicolaisen M., Jarna A., Iversen S., Hermanns R. L., Böhme M., Molina F. X. Y. Database and online map service on unstable rock slopes in Norway – From data perpetuation to public information. *Geomorphology*. 2015, vol. 249, pp. 69–81. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2015.08.005.

21. Ficker T., Martisek D. Database 3D surfaces for evaluation of Joint Rock Coefficients. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 161, pp. 1361 – 1366. DOI: 10.1016/J.PROENG.2016.08.656.
22. Zhao L., Zhang S., Huang D., Wang X. A digitalized 2D particle database for statistical shape analysis and discrete modeling of rock aggregate. *Construction and Building Materials*. 2020, vol. 247, article 117906. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117906.
23. Connolly T., Begg C. *Database Systems. A practical approach to design, implementation, and management*. 3rd ed. Boston: Addison-Wesley, 2001, 1236 p.
24. Grolinger K., Higashino W. A., Tiwari A., Capretz M. A. Data management in cloud environments: NoSQL and NewSQL data stores. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*. 2013, vol. 2, pp. 1 – 24. DOI: 10.1186/2192-113X-2-22.
25. Date C. J. *Database design and relational theory: Normal forms and all that jazz*. 2012. DOI: 10.1007/978-1-4842-5540-7.
26. Ma X. Knowledge graph construction and application in geosciences. A review. *Computers & Geosciences*. 2022, vol. 161, article 105082. DOI: 10.1016/j.cageo.2022.105082.
27. Wyborn L. A. I., Cox S. J. D., Klump J., Lehnert K. A. A modular approach to developing interdisciplinary, interoperable standards for geochemical data based on the Semantic Sensor Network (SSN) Ontology. 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.24898.22722.
28. Davis W., Hunt C. R. Knowledge graphs for seismic data and metadata. *Applied Computing and Geosciences*. 2024, vol. 21, article 100151. DOI: 10.1016/j.acags.2023.100151.
29. Catsoulis S., Singh J.-S., Narayanan C., Lakehal D. Integrating supervised learning and applied computational multi-fluid dynamics. *International Journal of Multiphase Flow*. 2022, vol. 157, no. 15, article 104221.
30. Zhao M., Xiao Z., Chen S., Fang L. DiTing: A large-scale Chinese seismic benchmark dataset for artificial intelligence in seismology. *Earthquake Science*. 2023, vol. 25, no. 2, pp. 84 – 94. DOI: 10.1016/j.eqs.2022.01.022.
31. Veselovskiy R. V., Dubinya N. V., Ponomarev A. V., Fokin I. V., Patonin A. V., Pasenko A. M., Fetisova A. M., Matveev M. A., Afinogenova N. A., Rud'ko D. V., Chistyakova A. V. Shared research facilities «Petrophysics, geomechanics and paleomagnetism» of the Schmidt institute of physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022, vol. 13, no. 2. [In Russ]. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0579.
32. Codd E. F. *The relational model for database management*, Version 2, Addison-Wesley; 1990, 567 p.
33. Muruzábal M. M., Geyer A., Aulinas M., Albert H., Vilà M., Micheo F., Bolós X., Pedrazzi D., Gisbert G., Planagumà L. CatVolc. A new database of geochemical and geochronological data of volcanic-related materials from the Catalan Volcanic Zone (Spain). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2024, vol. 446, article 107998. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107998.
34. Liolios P., Exadaktylos G. A relational rock mechanics database scheme with a hierarchical structure. *Computers and Geosciences*. 2011, vol. 37, pp. 1192 – 1204. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.02.014.
35. Bär K., Reinsch T., Bott J. The PetroPhysical Property Database (P3) – a global compilation of lab-measured rock properties. *Earth System Science Data*. 2020, vol. 12, pp. 2485 – 2515. DOI: 10.5194/essd-12-2485-2020, 2020.
36. Weydt L. M., Ramírez-Guzmán Á. A., Pola A., Lepillier B., Kummerow J., Mandrone G., Comina C., Deb P., Norini G., Gonzalez-Partida E., Avellán D. R., Macías J. L., Bär K., Sass I. Petrophysical and mechanical rock property database of the Los Humeros and Acoculco geothermal fields (Mexico). *Earth System Science Data*. 2021, vol. 13, pp. 571 – 598. DOI: 10.5194/essd-13-571-2021.
37. Philippe D., Lassin A., Piantone P., Azaroual M., Jacquemet N., Fabbri A., Gaucher E. C. Thermodem. A geochemical database focused on low temperature water/rock interactions and waste materials. *Applied Geochemistry*. 2012, vol. 27, no. 10, pp. 2107 – 2116. DOI: 10.1016/J.APGEOCHEM.2012.06.002.
38. Horsburgh J., Audfenkampe A., Mayorga E., Lehnert K., Hsu L., Song L., Jones A., Damiano S., Tarboton D., Valentine D., Zaslavsky I., Whitenack T. Observations Data Model 2. A community information model for spatially discrete Earth observations. *Environmental Modelling, Software*. 2016, vol. 79, pp. 55 – 74. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.01.010.
39. Kallas L., Klöcking M., Sturm A., Sarbas B., Möller-McNett S., Geestmann M., Pestov P., Kurzawe D., Willbold M., Wörner G. *Advancing FAIR Principles in Geochemistry: The GEOROC Database and DIGIS Initiative*. Sektionstreffen Petrologie/Petrophysik und Geochemie, Karlsruhe. 2024. DMG. DOI: 10.5281/zenodo.11527479.
40. Klöcking M., Sturm A. *DIGIS Data Model for GEOROC 2.0 (1.0.0)*. Zenodo. Software. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10468217.

41. Valitov M. G., Kharchenko T. A., Terekhov E. P. Physical properties of rocks of the Kuril Island arc system, Sakhalin Island and some morphostructures of the Okhotsk Sea. *RU 2022622201 Database*, 06.09.2022. [In Russ].

42. Rochev V. F. Laboratory research data on the disintegration of frozen soils under the simultaneous influence of an aquatic environment and a magnetic field at placer gold deposits in the eastern part of the Amur Region. *RU 2020621347 Database*, 04.08.2020. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Краюшкин Денис Владиславович*<sup>1</sup> — аспирант,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»; младший научный сотрудник,  
e-mail: KrayushkinDenV@yandex.ru,  
ORCID ID: 0009-0004-5474-1397,

*Казначеев Павел Александрович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
ведущий научный сотрудник, e-mail: p\_a\_k@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-9503-0047,

*Белобородов Денис Евгеньевич*<sup>1</sup> — канд. геол.-минерал. наук,  
старший научный сотрудник, e-mail: beloborodov@ifz.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-1917-7845,

*Пономарев Александр Вениаминович*<sup>1</sup> — д-р физ.-мат. наук,  
главный научный сотрудник, e-mail: avp@ifz.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-8737-0017,

*Индаков Глеб Сергеевич*<sup>1</sup> — аспирант,  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;  
инженер-исследователь, e-mail: indakov.gs16@physics.msu.ru,  
ORCID ID: 0009-0009-7564-9852,

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

**Для контактов:** Краюшкин Д.В., KrayushkinDenV@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*D.V. Krayushkin*<sup>1</sup>, Graduate Student,  
HSE University, 109028, Moscow, Russia;  
Junior Researcher, e-mail: KrayushkinDenV@yandex.ru,  
ORCID ID: 0009-0004-5474-1397,

*P.A. Kaznacheev*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher,  
e-mail: p\_a\_k@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9503-0047,

*D.E. Beloborodov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),  
Senior Researcher, e-mail: beloborodov@ifz.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-1917-7845,

*A.V. Ponomarev*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Chief Researcher,  
e-mail: avp@ifz.ru, ORCID ID: 0000-0002-8737-0017,

*G.S. Indakov*<sup>1</sup>, Graduate Student, Lomonosov Moscow  
State University, 119991, Moscow, Russia;  
Research Engineer, e-mail: indakov.gs16@physics.msu.ru,  
ORCID ID: 0009-0009-7564-9852,

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian  
Academy of Sciences, 123242, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** D.V. Krayushkin, e-mail: KrayushkinDenV@yandex.ru.

Получена редакцией 09.07.2024; получена после рецензии 24.12.2024; принята к печати 10.03.2025.

Received by the editors 09.07.2024; received after the review 24.12.2024; accepted for printing 10.03.2025.