

В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Невдах

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Представлены существующие цифровые модели земной коры, рассмотрены перспективы реализации современных концепций Industry 4.0, рекурсивной декомпозиции данных, «цифровых двойников». Для создания цифровой модели геодинамических процессов в литосфере Земли применена технология аналитической обработки данных OLAP, представленных в виде гиперкуба. Показаны атрибуты и содержание многомерных массивов данных о геодинамических характеристиках литосферы. База данных (БД) реализована на языке программирования Borland Delphi 7.0. В программе предусмотрены такие виды манипулирования данными, как срез, отображение страницы, нарезка на кубики и ломтики, вращение. Сделан вывод о том, что это позволяет не только формировать самые разнообразные запросы к БД, но и на более детальном и качественном уровне реализовывать различные модели оценки геодинамического риска.

Ключевые слова: цифровая модель, геодинамика, литосфера, база данных, аналитическая обработка.

V.A. Minaev, A.O. Faddeev, R.T. Akhmetshin, T.M. Nevdakh

DIGITAL MODEL OF GEODYNAMIC PROCESSES IN THE EARTH'S LITHOSPHERE

The article highlights the existing digital models of the earth's crust, talks about the prospects for the implementation of modern concepts of Industry 4.0, recursive data decomposition, "digital counterparts". To create a digital model of geodynamic processes in the Earth's lithosphere, the technology of analytical processing of OLAP data presented in the form of a hypercube is used. Attributes and content of multidimensional arrays of data on geodynamic characteristics of the lithosphere are shown. The database (DB) is implemented in Borland Delphi 7.0 programming language. The program provides for such types of data manipulation as slicer, page display, slicing into cubes and slices, rotation. It is concluded that it allows not only to form a variety of requests to the database, but also to implement various models of geodynamic risk assessment at a more detailed and qualitative level.

Keywords: digital model, geodynamics, lithosphere, database, analytical processing.

Введение

В научной литературе описаны существующие на настоящий момент времени глобальные модели земной коры – CRUST 5.1 и CRUST 2.0 [1; 2], представляющие собой распределенные по сетке данные соответственно с осреднением $5^\circ \times 5^\circ$ и $2^\circ \times 2^\circ$, содержащие информацию о скоростях продольных и поперечных волн, о плотности во всех слоях земной коры, включая подкорковый, а также о глубинах раздела земной коры, включая границу Мохоровичича (Мохо). Принципиально отличается от них разработанная в 2013 году модель CRUST 1.0, представляющая собой уже 9-уровневую систему данных с осреднением по сетке $1^\circ \times 1^\circ$ [3].

© Минаев В.А., Фаддеев А.О., Ахметшин Т.Р., Невдах Т.М., 2018.

Информация, представленная в этой модели, позволила выполнить количественные оценки таких важных распределенных параметров земной коры, как температура, вязкость, упругие модули напряжения, деформации, смещения для различных глубинных уровней земной коры [4; 5].

Полученная в результате проведенных исследований обширная числовая информация по характеристикам литосферных геодинамических процессов дала нам возможность вплотную подойти к реализации задачи построения принципиально новой цифровой модели литосферы Земли, включающей в себя не только данные предыдущих моделей, но и рассчитанные авторами характеристики литосферных геодинамических процессов.

Развитие информационных систем в области геофизических исследований требует разработки новых подходов, стандартов и инструментария для представления знаний в области геодинамических процессов. Пока же создание целостного образа геодинамики Земли не находило реального воплощения в эффективной цифровой модели, включающей системные данные не только о геодинамических характеристиках, но и о связях между ними, описанные с помощью современных математических моделей. Создание цифровой модели видится в реализации таких современных концепций, как Industry 4.0 [6], рекурсивная декомпозиция данных [7], «цифровой двойник» [8].

Поскольку новую цифровую модель литосферы, представляющую собой современную базу данных (БД), необходимо наполнить самой разнообразной информацией о характеристиках литосферных геодинамических процессов для различных глубинных слоев литосферы, с одной стороны, а с другой стороны, привязать эту информацию к конкретным географическим координатам, нами на настоящем этапе для построения БД была применена технология оперативной аналитической обработки данных OLAP (OnLine Analytical Processing).

Как известно, основой OLAP-технологии является построение многомерного представления данных, когда они даются не в форме реляционных таблиц, а в виде упорядоченных многомерных массивов двух видов [9]:

1) гиперкубов (все хранимые в БД ячейки должны иметь одинаковую мерность, т. е. находиться в максимально полном базисе измерений);

2) поликубов (каждая переменная хранится с собственным набором измерений, и все связанные с этим сложности обработки перекладываются на внутренние механизмы системы).

Гиперкубическая форма представления данных

В настоящей работе представлена гиперкубическая форма многомерных массивов данных. Предположим, что задана некоторая схема представления БД $RD = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$, где R_i – отношения, определенные на множестве атрибутов $\Lambda = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ (табл. 1). В фигурных скобках в таблице уточнены области определения некоторых атрибутов.

Для атрибутов установим следующие зависимости:

$$DEP = \{L_2 L_3 L_{16} \rightarrow L_1, L_4 L_5 L_{16} \rightarrow L_1, L_6 L_7 L_{16} \rightarrow L_1, L_8 L_9 L_{16} \rightarrow L_1, L_{10} L_{11} L_{16} \rightarrow L_1, \\ L_{12} L_{13} L_{16} \rightarrow L_1, L_{14} L_{15} L_{16} \rightarrow L_1\}. \quad (1)$$

Зависимости (1) соответствуют следующим отношениям:

- 1) координаты ячейки $R_1 \{L_2, L_3, L_{16}, L_1\}$;
- 2) экспериментальные характеристики литосферных геодинамических процессов $R_2 \{L_4, L_5, L_{16}, L_1\}$;
- 3) расчетные характеристики литосферных геодинамических процессов $R_3 \{L_6, L_7, L_{16}, L_1\}$;
- 4) нормальные геодинамические напряжения $R_4 \{L_8, L_9, L_{16}, L_1\}$;

- 5) сдвиговые геодинамические напряжения $R_5 \{L_{10}, L_{11}, L_{16}, L_1\}$;
 6) смещения в геологической среде $R_6 \{L_{12}, L_{13}, L_{16}, L_1\}$;
 7) величина геодинамического риска $R_7 \{L_{14}, L_{15}, L_{16}, L_1\}$.

Таблица 1

Схема представления БД

Обозначение атрибута	Содержание атрибута
L_1	Порядковый номер ячейки
L_2	Порядковый номер координаты
L_3	Наименование координаты {долгота, широта, глубина}
L_4	Порядковый номер экспериментальной характеристики литосферных геодинамических процессов
L_5	Наименование экспериментальной характеристики литосферных геодинамических процессов {плотность, скорость продольных волн, скорость поперечных волн}
L_6	Порядковый номер расчетной характеристики литосферных геодинамических процессов
L_7	Наименование расчетной характеристики литосферных геодинамических процессов {давление, объемный модуль упругости, модуль сдвига, температура, вязкость}
L_8	Порядковый номер компоненты нормальных напряжений
L_9	Наименование компоненты нормальных напряжений $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_r\}$
L_{10}	Порядковый номер компоненты сдвиговых напряжений
L_{11}	Наименование компоненты сдвиговых напряжений $\{\tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{xy}, \tau_z\}$
L_{12}	Порядковый номер составляющей вектора смещений
L_{13}	Наименование составляющей вектора смещений $\{u_x, u_y, u_z, u_r\}$
L_{14}	Порядковый номер вида геодинамического риска
L_{15}	Наименование вида оценки геодинамического риска {вероятностная, энергетическая, нечеткая}
L_{16}	Количественное значение параметра атрибута

Гиперкуб определяется в виде совокупности измерений $\{D_1, D_2, \dots, D_h\}$ (где D_s – множество имен атрибутов; $s = 1, 2, \dots, h$) и множества имен атрибутов M , которые называются мерами. Значения D_s являются значениями координат гиперкуба, значения M располагаются в его рабочей области.

Для того чтобы в одной ячейке гиперкуба было не более одного значения атрибута меры, предполагается выполнение функциональной зависимости

$$D_1, D_2, \dots, D_h \rightarrow M. \tag{2}$$

Для динамического формирования реализации гиперкуба исходные множества измерений D и мер M будем задавать в виде расширенных имен атрибутов, а именно: $R_i.L_j, L_j \in [R_i]$ (где R_i – наименование i -го отношения; $[R_i]$ – схема i -го отношения).

Тогда схема гиперкуба, если ограничиться двумя измерениями, может быть представлена, например, в следующем виде:

$$\{R_1.L_1\} \times \{R_2.L_5 (R_2.L_{16})\}, \tag{3}$$

где $D_1 = \{R_1.L_1\}$, $D_2 = \{R_2.L_5\}$ – измерения; $M = \{R_2.L_{16}\}$ – мера, или

$$\{R_1.L_1\} \times \{R_3.L_7(R_3.L_{16})\}, \quad (4)$$

где $D_1 = \{R_1.L_1\}$, $D_2 = \{R_3.L_7\}$ – измерения; $M = \{R_3.L_{16}\}$ – мера.

После того как сформирована схема гиперкуба с установлением иерархий в измерениях и присоединением мер к атрибутам измерений, воспользуемся простейшим методом решения задачи формирования гиперкуба по множеству отношений при отсутствии логических ограничений F (т. е. $F = \emptyset$), а именно: выполним операцию естественного соединения отношений для формирования промежуточного представления БД:

$$TJ = R_1[V_1] \oplus R_2[V_2] \oplus \dots \oplus R_k[V_k], \quad (5)$$

где \oplus – операция естественного соединения; V_i – множество атрибутов $L_j \in [R_i]$, для которых либо существует измерение D_s такое, что $R_i.L_j \in D_s$, либо $R_i.L_j \in M$.

Затем значения координат формируются в виде проекций по соответствующим атрибутам: $TJ[D_s]$, с необходимой сортировкой кортежей каждого измерения в соответствии с иерархией. Завершается построение гиперкуба присваиванием значений мер M в его рабочей области, т. е. для каждого кортежа $t \in TJ$ на пересечении значений координат $t[D_s]$ (где $s = \overline{1, h}$) ставится значение $t[L_j]$, $R_i.L_j \in M$.

Описанная технология применена при построении БД характеристик литосферных геодинамических процессов. Приведем фрагмент блока описаний переменных программы построения БД, реализованной на языке программирования Borland Delphi 7.0 (рис. 1).

```

type atom = record
  Value1: real;
  Value2: real;
  Value3: real;
  Value4: real;
  Value5: real;
end;
molecula = record
  Long: real;
  Lat: real;
  Depth: integer;
  Around: array [1..8] of atom;
end;

var Pole: array [1..21] of byte;
    Mode, Model: byte;
    Litosphere: array [1..360, 1..180, 0..80] of molecula;
    Plate: array [1..64800] of molecula;
    A: molecula;
    Z, Depth1, Depth2, X1, X2, Y1, Y2, XCount, YCount, ZCount: integer;
    DepthFile: string[4];
    Count, PointCoord, StartCoord, FinCoord: longint;
    Longitude, Latitude, Long1, Long2, Lat1, Lat2: real;

```

Рис. 1. Фрагмент блока описания переменных программы построения БД

При описании переменных определены два типа данных: <atom> и <molecula>. Оба типа определены как записи, но в первом случае запись структурно состоит из пяти вещественных полей, во втором случае – из двух, одно поле целочисленное, а другое само является записью типа <atom>.

Графически элемент массива <Litosphere>, являющийся объявленным типом данных <molecula>, представлен на рис. 2.

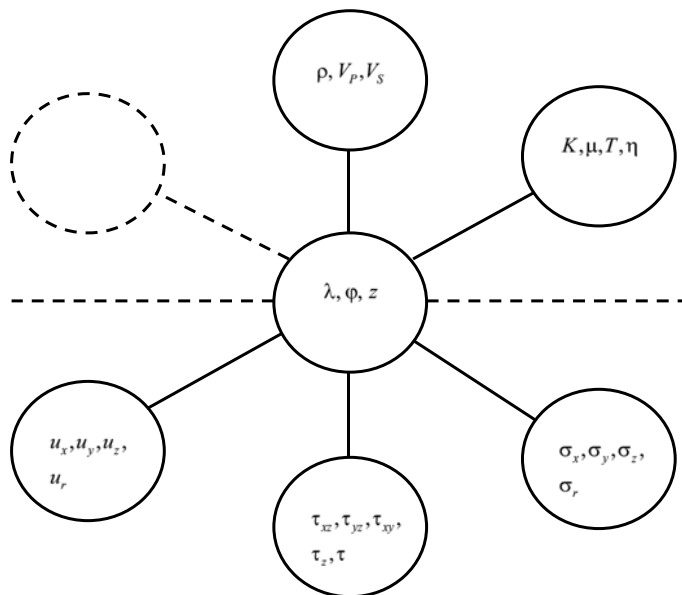


Рис. 2. Графическое представление элемента массива <Litosphere>:

λ – географическая долгота; ϕ – географическая широта; z – глубина;
 ρ – плотность вещества; V_p – скорость продольных волн; V_s – скорость поперечных волн; K – объемный модуль упругости; μ – модуль сдвига; T – температура; η – вязкость; σ_x – x -компонента нормальных напряжений; σ_y – y -компонента нормальных напряжений; σ_z – z -компонента нормальных напряжений; σ_r – радиальные нормальные напряжения; τ_{xz} – сдвиговые напряжения в плоскости XZ ; τ_{yz} – сдвиговые напряжения в плоскости YZ ; τ_{xy} – сдвиговые напряжения в плоскости XY ; τ_z – вертикальные нормальные напряжения; τ – величина вектора полных напряжений;
 u_x – x -составляющая вектора смещений; u_y – y -составляющая вектора смещений; u_z – z -составляющая вектора смещений;
 u_r – радиальная составляющая вектора смещений

Сам же массив <Litosphere> представляет собой структурированную информацию о литосфере Земли, послойно размещенную в многомерной базе данных о характеристиках литосферных геодинамических процессов.

Тип данных <molecula> так назван потому, что он напоминает по своей структуре молекулу, состоящую из атомов. В такой «молекуле» имеется центральный «атом», содержащий информацию о координатах отдельной элементарной ячейки (элементарного объема литосферы), и ряд «второстепенных атомов», содержащих структурированную информацию о характеристиках литосферных геодинамических процессов.

Возможности гиперкубического представления данных

Согласно структуре «молекулы» (см. рис. 2), в ней может быть определено до восьми «второстепенных атомов» (один такой «атом» показан пунктирной окружностью, к двум другим, пока не существующим «атомам», указаны связи в виде пунктирных линий). При построении БД участвуют только пять таких «второстепенных атомов». Это означает, что внутри БД предусмотрены дополнительные вычисления,

позволяющие на основе имеющейся в БД информации выполнять расчеты и заполнять полученными данными «пустые» слои в БД.

Подобная структурная организация БД позволяет назвать ее символически «молекулярной базой данных».

Для работы с созданной базой данных о характеристиках литосферных геодинамических процессов (имеющей объем 1,67 Гб) разработана на языке программирования Borland Delphi 7.0 программа DMGRLE (Digital Model Geodynamic Risk Litosphere of the Earth – Цифровая модель оценки геодинамического риска в литосфере Земли), представляющая собой систему выборки и обработки информации из БД характеристик литосферных геодинамических процессов.

В программе предусмотрены такие виды манипулирования данными, как «Срез» (Slice), «Отображение страницы» (Page Display), «Нарезка на кубики и ломтики» (Slice and Dice), «Вращение, пивотинг» (Rotate, Pivot).

«Срез» (Slice) – это созданное пользователем подмножество гиперкуба, получившееся в результате фиксации значения одного или более измерений.

Текущее представление среза многомерной информации называется «Отображением страницы» (Page Display). Измерения, расположенные по горизонтали (поперек дисплея), определяют измерения в столбцах таблицы.

Строки таблиц измерений определяются измерениями, расположенными по вертикали (вдоль дисплея). Выбор элемента измерения страницы позволяет определить, какая именно страница отображается в данный момент. Страница во многом напоминает обычную электронную таблицу и может быть интегрирована практически с любой программой электронных таблиц, где пользователь может в дальнейшем вносить изменения в каждую ячейку.

«Нарезка на кубики и ломтики» (Slice and Dice) – термин, использующийся для описания функции сложного анализа данных, обеспечиваемой средствами OLAP выборки данных (продольные и поперечные, плоскостные и объемные срезы) из многомерного куба с заданными значениями и заданным взаимным расположением измерений, при котором пользователь обычно использует операции вращения куба данных и детализации (либо агрегирования) данных. Такая возможность предоставляется пользователю при реализации как точечной, так и объемной выборки из массива данных БД характеристик литосферных геодинамических процессов.

Изменение порядка представления измерений, применяемое при двухмерном представлении данных, называется «Вращением, пивотингом» (Rotate, Pivot). Эта операция обеспечивает возможность визуализации данных в форме, наиболее комфортной для их восприятия. Операция вращения может заключаться в перестановке местами строк и столбцов таблицы либо перемещении интересующих измерений в столбцы или строки создаваемого отчета, что позволяет придавать ему желаемый вид.

Выводы

1. В статье представлена принципиально новая, не имеющая аналогов ни в отечественной, ни в зарубежной практике геофизических исследований, цифровая модель литосферы Земли, представляющая собой компьютерную базу данных характеристик литосферных геодинамических процессов.

2. При построении БД использована технология оперативной аналитической обработки данных OLAP с применением гиперкубического представления данных.

3. Для работы с БД характеристик литосферных геодинамических процессов разработана специализированная программа DMGRLE – Digital Model Geodynamic Risk Litosphere of the Earth (Цифровая модель оценки геодинамического риска в литосфере Земли), позволяющая не только формировать самые разнообразные запросы к БД, но и на более детальном и качественном уровне реализовывать различные модели оценки геодинамического риска.

Литература

1. *Mooney W.D., Laske G., Masters T.G.* CRUST 5.1: A global Crustal Model at $5^\circ \times 5^\circ$ // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103B. – P. 727–747.
2. *Senachin V.N., Baranov A.A.* Gravity anomalies of the crust and upper mantle for Central and South Asia // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2016. – Vol. 7 (4). – № 4. – P. 513–528.
3. CRUST 1.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html> (дата обращения: 11.05.2018).
4. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Методика оценки геоэкологического риска и геоэкологической безопасности ландшафтно-территориальных комплексов : материалы Семнадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности – СБ-2008», 30 окт. 2008 г. – М. : Акад. ГПС МЧС России, 2008. – С. 96–102.
5. *Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В., Павлова С.А.* Математическое моделирование сейсмических рисков // *Спецтехника и связь.* – 2013. – № 5. – С. 58–63.
6. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives_Industry.4.0_2015.pdf (дата обращения: 11.05.2018).
7. *Илюшин А.И., Колмаков А.А., Меньшов И.С.* Построение параллельной вычислительной модели путем композиции вычислительных объектов // *Математическое моделирование.* – 2011. – Т. 23. – № 7. – С. 97–113.
8. Цифровой двойник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siemens.kz/assets/images/resheniya/Budushchee%20promyshlennosti%20mart%202016.pdf> (дата обращения: 11.05.2018).
9. *Кудрявцев Ю.* OLAP-Технологии: обзор решаемых задач и исследований // *Бизнес-информатика.* – 2008. – № 1. – С. 66–70.

References

1. *Mooney W.D., Laske G., Masters T.G.* CRUST 5.1: A global Crustal Model at $5^\circ \times 5^\circ$ // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103B. – P. 727–747.
2. *Senachin V.N., Baranov A.A.* Gravity anomalies of the crust and upper mantle for Central and South Asia // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2016. – Vol. 7 (4). – № 4. – P. 513–528.
3. CRUST 1.0 [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html> (data obrashcheniya: 11.05.2018).
4. *Minaev V.A., Faddeev A.O.* Metodika otsenki geoekologicheskogo riska i geoekologicheskoy bezopasnosti landshaftno-territorial'nykh kompleksov : materialy Semnadsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sistemy bezopasnosti – SB-2008», 30 okt. 2008 g. – M. : Akad. GPS MCHS Rossii, 2008. – S. 96–102.
5. *Minaev V.A., Faddeev A.O., Abramova A.V., Pavlova S.A.* Matematicheskoe modelirovanie seysmicheskikh riskov // *Spetstekhnika i svyaz*. – 2013. – № 5. – S. 58–63.
6. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives_Industry.4.0_2015.pdf (data obrashcheniya: 11.05.2018).
7. *Ilyushin A.I., Kolmakov A.A., Men'shov I.S.* Postroenie parallel'noy vychislitel'noy modeli putem kompozitsii vychislitel'nykh ob'ektov // *Matematicheskoe modelirovanie.* – 2011. – T. 23. – № 7. – S. 97–113.
8. Tsifrovoy dvoynik [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.siemens.kz/assets/images/resheniya/Budushchee%20promyshlennosti%20mart%202016.pdf> (data obrashcheniya: 11.05.2018).
9. *Kudryavtsev Yu.* OLAP-Tekhnologii: obzor reshaemykh zadach i issledovaniy // *Biznes-informatika.* – 2008. – № 1. – S. 66–70.