

Объектно-иерархический подход к созданию Workflow для задач геологического моделирования

А. А. Сидоров

АУ ХМАО-Югры «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпилемана», Тюмень, Россия

Аннотация. В работе предлагается оригинальный подход к автоматизации решения задач, связанных с геолого-математическим моделированием. Пространство данных вычислительного проекта представляется в виде динамической системы, состоящей из связанных объектов, характеризующихся набором дискретных состояний. Отношения зависимости между объектами формируют иерархическую структуру, представляемую в виде ориентированного графа, сохраняющую все параметры, необходимые для проведения расчетов. Переходы между состояниями объектов отражают стадии выполнения задачи и обеспечивают возможность автоматического построения всех элементов модели. Означенный подход реализован в программном продукте GST. На его основе реализован эффективный инструментарий, позволяющий формировать алгоритмы решения геологических задач и выполнять их в автоматическом режиме. Объектно-иерархическая структура пространства данных обеспечивает строгое соответствие результатов моделирования расчетной схеме и исходным данным с учетом их периодического изменения.

Ключевые слова: геолого-математическое моделирование, объектно-иерархический подход, workflow, GST, автоматизация.

DOI 10.14357/20718632210410

Введение

Создание цифровых моделей геологических объектов является важным и наукоемким звеном в процессе поиска, разведки и добычи полезных ископаемых, при этом оно обладает рядом характерных особенностей, осложняющих применение программных комплексов общего назначения. Эти особенности заключаются как в специфике хранения и представления исходных данных, так и в сложности самого процесса построения модели.

Геолого-математическое моделирование – своего рода преобразование исходного описания геологической среды в целевое, конечное.

Первичное описание осуществляется на основе данных натурных наблюдений, полученных непосредственно по результатам проведения сейсморазведочных работ, геофизических исследований скважин, подъема кернового материала и так далее. На выходе из процедуры обработки и интерпретации первичных данных формируется локальное, привязанное к точкам наблюдений, описание параметров изучаемого геологического объекта: глубины залегания горизонтов, толщины пластов, литотипы, фации и т.д. На следующем этапе осуществляется переход от локального к непрерывному описанию, когда для каждой точки модельной области определяется искомый набор свойств.

Программные продукты, ориентированные на решение задач преобразования первичной информации обобщены названием «интерпретационные пакеты». Пакеты геолого-математического моделирования, об одном из них пойдет речь в данной статье, предназначены для пространственного восполнения исследуемых свойств с использованием результатов интерпретации, а также экспертного представления о характере распределения искомых параметров.

1. Представление геологических данных и автоматизация расчетов

В геоинформационных системах и ряде специализированных приложений геологическая модель традиционно представляется в виде набора графических слоев, отображаемых на картах или в окнах визуализации. Такая дискретность отчасти происходит из специфики геологической науки, которая в отличие, например, от геофизики или подземной гидродинамики, где изучаются физические поля и процессы, имеет дело с объектами, находящимися в определенной иерархии: комплексами, горизонтами, пластами, свитами и другими сущностями. Программное обеспечение оперирует цифровым представлением этих объектов: сетками (гридами), кубами свойств, координатной информацией, дополненной атрибутивными таблицами и т.д. При этом эффективность ПО, помимо применения современных математических методов, определяется организацией *пространства данных и потока работ*.

Под пространством данных будем понимать совокупность исходной геологической информации, промежуточных, вспомогательных и конечных результатов расчетов. Типизация данных может осуществляться как по их геометрическому представлению (точки, линии, сетки), так и по смысловому, характеризующему вид информации. В настоящее время в профессиональном программном обеспечении преобладает подход, когда типы данных максимально совпадают с видами геологической информации: кривые ГИС, стратиграфические разбивки, траектории стволов скважин, сейсмическая корреляция, горизонты, разломы. В таких распространенных продуктах как Petrel

и IRAP RMS структура пространства данных регламентирована – данные содержатся в контейнерах, строго соответствующих их типам. Преимущество этого подхода вполне очевидно: специалист геолог оперирует привычными для него сущностями, которые размещены на своих местах. Однако жесткая регламентация снижает гибкость технологии, когда требуется решать не совсем стандартные задачи моделирования.

В идеале процесс моделирования начинается после получения выверенных результатов интерпретации данных геофизики и других исследований: стартует пошаговый расчет элементов модели с их последовательной верификацией. Соблюдение этих условий дает возможность выполнить моделирование за один проход, однако, на практике это почти нереализуемо. Сбор, анализ, подготовка, интерпретация геологической информации процедура довольно длительная, поэтому для старта стадии моделирования нет возможности ожидать полного окончания подготовительного этапа. В реальных задачах корректировка и досылка дополнительных данных происходит параллельно с формированием геологической модели, и специалист вынужден не единожды повторять вычисления с учетом обновленной исходной информации. Необходимость многократных пересчетов не обязательно связана с неидеальной организацией рабочего процесса. Любая геолого-математическая модель отражает степень изученности земной толщи на определенный момент времени, и по мере поступления новых данных, она должна быть актуализирована. Таким образом, специализированные программы должны обладать достаточно разнообразным инструментарием, чтобы гарантировать решение сложных, часто нестандартных геологических задач, а также обеспечивать согласованность потоков данных и контроль над последовательностью выполнения счетных операций.

Подобная необходимость возникала во многих областях применения компьютерных методов, и в середине 1990-х годов стали активно внедряться подходы к автоматизированному управлению вычислительными процессами, получившими обобщенное название *workflow*-технологии. Буквально данный термин перево-

дится как «поток работ», но по смыслу ближе понятие «сценарий». В настоящее время workflow-методы чаще используются для автоматизации бизнес-процессов, но формализм подхода может быть применен к любым другим процессам. Workflow-технология подразумевает, что сценарий полностью вычленен из программного кода [1] и представлен скриптом, ориентированным графом, блок-схемами в стандартах IDEF, BPMN и др.

Для задач геолого-математического моделирования workflow-методы рассматриваются в более узком аспекте: в основном, как алгоритмизация создания и расчета модели, от загрузки исходных данных до стадии анализа результатов моделирования и формирования отчета. Сценарий решения обеспечивает должный порядок вызова расчетных функций программы и хранит в себе все ключевые и вспомогательные параметры моделирования. Он исполняется ядром приложения необходимое число раз в автоматическом режиме для минимизации рутинных действий пользователя и исключения случайной ошибки. Workflow-методы пока не стали обязательным стандартом для геологического ПО, однако, ряд компаний активно внедряет эту технологию. В программном продукте IRAP RMS [2] компании Roxar процесс вычислений представляется в виде линейного графа, вершины которого имеют смысл заданий с соответствующими аргументами и параметрами. Последовательность заданий формирует поток работ, который может быть исполнен целиком, либо частично, прерван или приостановлен. Технология позволяет сохранить в проекте структуру вычислений, запомнить настройки, оперативно повторить расчеты при изменении исходных данных. Подход к организации workflow, реализованный в продукте Petrel (Schlumberger), ближе по своей сути к скриптам, хотя в интерфейсе программы он представляется не в чисто текстовом виде. На его основе могут быть реализованы более сложные сценарии, содержащие циклы и условия. Автоматизация вычислительного процесса, реализованная в продукте Surfer (Golden Software), полностью базируется на интерпретируемом языке, который обеспечивает доступ к программному интерфейсу приложения (API).

В последние годы политика импортозамещения дала определенный толчок развитию отечественного ПО, в том числе продуктам, присутствовавшим на рынке ранее: ПАНГЕЯ – Certainty, DV-GEO, ingeosMAP, IsolineGIS, tNavigator, GST, OIS TERRA и ряду других. При этом задача автоматизации построений решается по-разному. В IsolineGIS автоматический пересчет некоторых стандартных задач встроен в ядро программы. В GST предлагается оригинальный подход, речь о котором пойдет ниже. Широкие возможности предоставляет workflow-технология, реализованная в программном комплексе tNavigator [3], позволяющая запоминать последовательность действий, работать с деревом данных, использовать циклы и условия, а также включать в алгоритм расчетов скрипты Python.

Скрипт, как способ алгоритмизации, предоставляет богатые возможности в организации последовательности вычислений, отображения, импорта и экспорта данных, однако требует от пользователя определенных навыков программирования. По этой и ряду других причин workflow-подход, по крайней мере в приложении к геологическому моделированию, остается специфической опцией для продвинутых пользователей, а многие компании-разработчики предпочитают не тратить ресурсы на автоматизацию расчетов, проектируя программное обеспечение по стандартным схемам.

2. Объектно-иерархический подход

Предлагаемый к рассмотрению объектно-иерархический подход реализован в программном продукте GST [4-6]. В его основе лежит понятие *объекта*, которое аналогично соответствующему термину в объектно-ориентированном программировании. *Иерархия* порождается способностью объектов состоять между собой в отношениях, которые могут быть двух видов:

1. Отношения типа родительский – дочерний объект. Эти отношения понимаются как подчиненность дочерних объектов родительским при выполнении ряда действий над последними (перемещение, удаление, копирование). Отношения этого типа порождают иерархию вложенности.

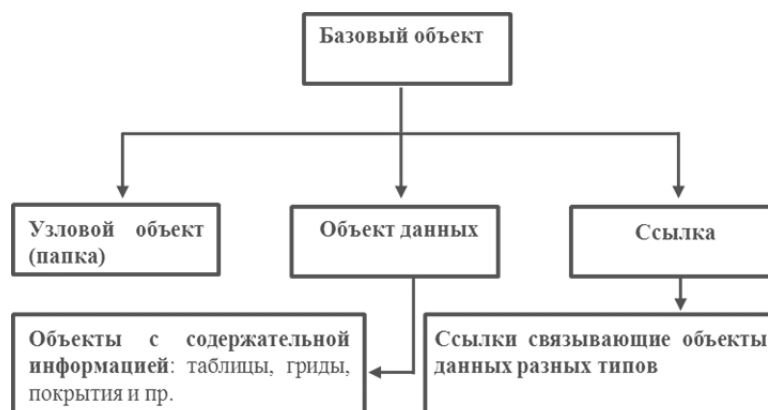


Рис. 1. Схема иерархии классов объектов в GST

2. Отношения зависимости возникают, когда один элемент модели, ассоциируемый с некоторым объектом, участвует в расчетах другого элемента геологической модели. Так возникает иерархия зависимости.

Выделяются три основных класса объектов, схема иерархии которых отображена на Рис. 1 (под иерархией понимается наследование классов).

Объект данных. Класс, предназначенный для хранения содержательной цифровой информации. Термин «информация» употребляется здесь в различных аспектах, под «содержательной информацией» понимается совокупность исходных, промежуточных и результирующих данных. Этот класс является базовым для объектов, непосредственно описывающих элементы геологической модели. Объекты данных в качестве «детей» могут содержать только *ссылки*.

Ссылка. Класс, предназначенный для задания отношения зависимости между двумя объектами данных. Существует правило: объект *B* находится в прямой зависимости от объекта *A*, если существует ссылка *R*, указывающая на объект *A* и имеющая в качестве родителя объект *B*. Ссылки не могут иметь дочерних объектов, а родителем может быть только объект данных.

Узловой объект (Папка). Предназначен для хранения в виде дочерних объектов других узлов и объектов данных. На вершине иерархии вложенности находится корневой узел, а множество его «детей» формируют пространство данных или, говоря техническим языком, проект.

Объект обладает свойством уникальности, которое реализовано в виде численного иден-

тификатора (ID), инициализируемого при создании объекта и освобождаемого только при его удалении. Таким образом, в проекте не может существовать двух и более объектов с одинаковыми идентификаторами. При этом имя объекта является исключительно описательным атрибутом. Внутренняя логика объекта описывается *константными атрибутами*, присваиваемыми при создании и далее неизменяемыми, *установочными свойствами*, характеризующими правила построения и представления объекта, а также *вычисляемой сущностью* – структурами, хранящими содержательную информацию, изменяемую в ходе расчетов.

Расчет «вычисляемой сущности» происходит через исполнение *функции построения*, детали работы которой задаются специалистом и определяются *методом* и *параметрами*. Возможен и обратный процесс – сброс вычисляемой сущности, т.е. «очистка» объекта. Исполнение функции построения характеризуется «стадией готовности» или *состоянием*. Состояния дискретны, стандартны и характеризуются уровнем:

Нулевой. Объект не готов к расчетам: не задан минимально необходимый набор параметров и зависимостей.

Первый. Задан минимально необходимый набор параметров и зависимостей, объект потенциально готов к расчетам.

Второй. Функция построения объекта находится в процессе исполнения.

Третий. Исполнение функции построения успешно завершено, объект построен.

Пусть между объектами A_i , которые назовем исходными, и вычисляемым объектом B с помощью ссылок R_i установлены отношения зависимости. В ходе исполнения функции построения объекта B данные из A_i в качестве аргументов поступает в расчетную процедуру. Ссылка является своего рода «шлюзом», по которому происходит передача информации: она содержит инструкции о том, как исходный объект должен использоваться в построении. Направление от исходных к вычисляемым объектам назовем направлением «*вверх по иерархии*», обратное направление, соответственно, «*вниз по иерархии*». Объект B является *зависимым* от объекта A , если существует путь «*вверх по иерархии*» от A к B , а объект A в таком случае является *базовым* по отношению к B . Направление вниз по иерархии ограничено объектами, не содержащими ссылок: их вычисляемая сущность загружается из внешних по отношению к проекту источников (файлы, базы данных). Это базовые объекты иерархии. Совокупность зависимостей между объектами выражается в виде направленного двудольного графа, который может содержать сходящиеся либо расходящиеся ветви, а также произвольное число независимых подграфов.

Типизация объектов абстрактна: тип характеризует не столько природу геологических данных, сколько способ их хранения и представления. Наиболее используемые типы – grids (сетки), линии и полигоны, а также таблицы, способны описать большую часть используемой в рамках 2D-моделирования геологической информации. Например, таблицами представляются результаты сейсмической корреляции, данные исследований скважин, произвольные точечные данные, а также отчетные формы анализа результатов. Сетки могут описывать структурные геологические поверхности, поля свойств либо произвольную функцию двух переменных, отражающую некоторую параметрическую зависимость. Типизация по способу представления позволяет стандартизованным инструментарием работать с широким спектром геологической информации, а также выходить за рамки задач геологического моделирования. В плане развития программы такой подход упрощает расширение ее функционала

без введения новых типов объектов, а только с пополнением списка методов их построения.

В результате рабочий проект представляет собой дерево, содержащее объекты нескольких стандартных типов. Базовые объекты иерархии, как правило, содержат информацию, поступающую в качестве исходных данных, при этом данные, различные по своему происхождению или степени достоверности, разнесены по разным объектам, что позволяет в дальнейших расчетах учитывать их индивидуальным образом. Объекты, описывающие элементы геологической модели, располагаются на следующих уровнях иерархии и также могут быть зависимыми друг от друга. Например, ряд геологических границ, именующихся опорными ввиду высокой контрастности акустических свойств, хорошо прослеживается на сейсмических разрезах и они могут быть отстроены с высокой степенью детальности. Границы с неконтрастными акустическими свойствами отчетливо выделяются только по гораздо более редко расположенным данным бурения, поэтому в идеологии предлагаемого подхода эти промежуточные границы находятся в иерархии зависимости выше, чем «опорные» и отстраиваются с учетом различных моделей конформности (согласного залегания).

В процессе формирования проекта специалист выполняет ряд стандартных действий: добавляет новые объекты, задает ссылочные связи, устанавливает метод и параметры построения. Последовательность таких шагов может описывать отдельную подзадачу, построение составного элемента модели, например, набора сеток, характеризующего геометрию и свойства одного пласта. И если модель состоит из множества пластов, то и дерево проекта будет содержать ряд идентичных фрагментов. Помимо пошагового формирования структуры проекта объектно-иерархический подход дает возможность конструировать модель из макроэлементов путем копирования как отдельных объектов, так и фрагментов графа.

Копия представляет собой новый объект с идентичным содержанием и параметрами построения. По правилу иерархии вложенности копируются все дочерние объекты, в том числе и ссылки. На Рис. 2 показана схема последова-

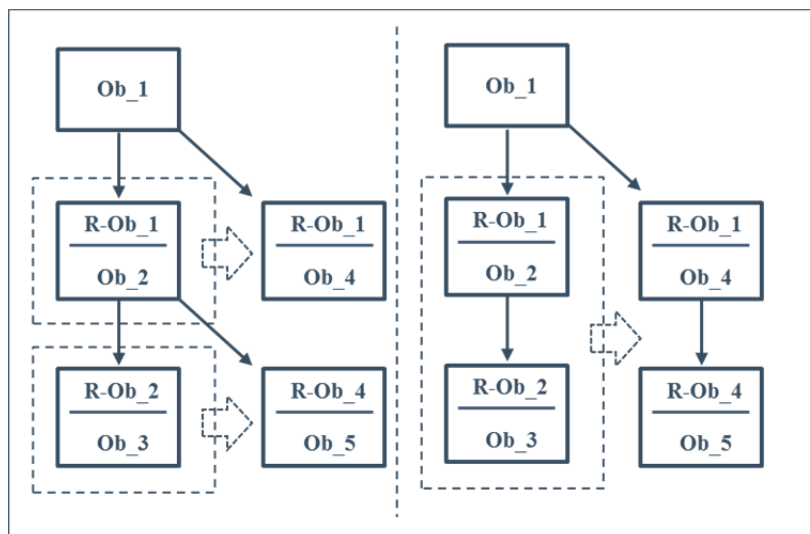


Рис.2. Схема копирования объектов: двух объектов по отдельности (слева), двух сгруппированных в «Папке» объектов (справа)

тельного копирования объектов (слева), а также совместного копирования, когда объекты сгруппированы в «Папке». Символами «R-Ob_i» обозначены дочерние ссылки на соответствующий объект.

При копировании одного объекта «Ob_3» (слева) создается новый идентичный объект «Ob_5» с дочерней ссылкой, указывающей на прежний объект «Ob_2». Если объекты «Ob_2» и «Ob_3» сгруппированы в папке, то копирование этой группы создает соответствующие копии «Ob_4» и «Ob_5», причем дочерняя ссылка объекта «Ob_4» указывает, как и прежде, на «Ob_1». Дочерняя ссылка объекта «Ob_5» переопределяется на новый объект «Ob_4», сохраняя, таким образом, схему зависимостей копируемой группы. Операция копирования порождает новую ветку в графе зависимостей. На практике таким образом можно оперативно организовать многовариантность расчетов с варьированием параметров построения, при этом оперируя не отдельными объектами, а составными элементами модели.

Операции *переопределения ссылки* и *превращения объекта* обеспечивают быструю модификацию графа зависимостей, которая выражается в разъединении, слиянии и перемещении отдельных его ветвей. Переопределение ссылки подразумевает переназначение ссылочного объекта, то есть переброска связи с одного объекта на другой с сохранением про-

чих параметров ссылки. Под превращением понимается создание копии объекта на базе другого объекта, то есть полное преобразование узла графа с сохранением его идентификатора.

3. Формирование и исполнение потока работ

На Рис. 3 слева показана схема решения в терминах объектно-иерархического подхода стандартной задачи картирования – построения сетки (грида) по набору точечных данных, которые исходно хранятся в некотором файле. Задача решается с помощью двух объектов данных – таблицы, в которую загружаются точки из файла, и грида, который представляет результирующую структурную поверхность. Дочерняя по отношению к гриду ссылка, указывающая на таблицу, устанавливает зависимость между этими двумя объектами. Иерархия вложенности в левой части рисунка характеризует структуру проекта, однако не отражает самого процесса расчета, который нагляднее выражается в виде сети Петри (справа).

Сети Петри [7] приобрели широкую популярность при описании дискретных динамических асинхронных систем, а одно из их практических приложений – автоматизация вычислительных процессов. Существует множество интерпретаций элементов сети Петри: чаще всего позиции P_i понимаются как «усло-

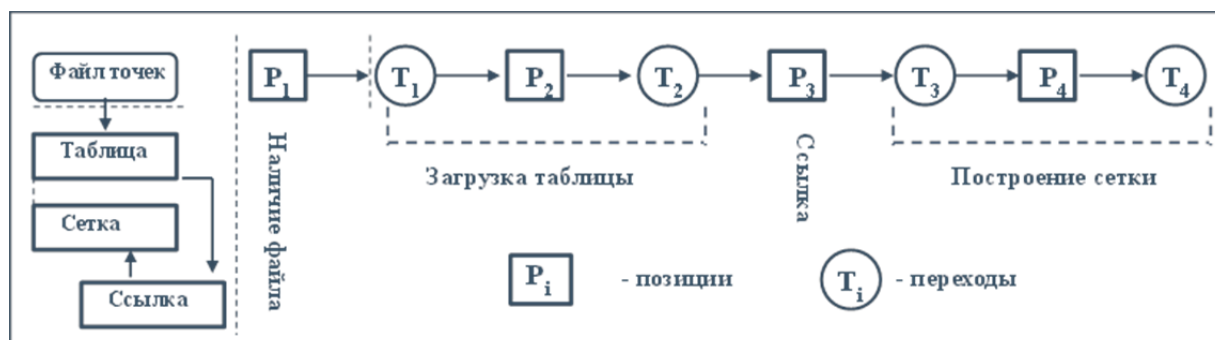


Рис. 3. Схема решения простейшей задачи картоирования, представленная в виде иерархии вложенности (слева) и сети Петри (справа)

вия», а переходы T_i как «события». Интерпретация маркеров (фишек) также зависит от специфики моделируемого процесса, но в большинстве расчетных задач роль фишек выполняют сами данные.

Если рассматривать объект данных в терминах условий и событий, то он является элементом, состоящим из двух переходов, изменяющих состояние объекта, и одной промежуточной позиции. Входной переход (T_1, T_3), обозначающий старт функции построения объекта, срабатывает при выполнении условий (P_1, P_3), указывающих на наличие необходимых для начала расчетов исходных данных. Выходной переход (T_2, T_4) срабатывает при успешном окончании функции построения (условия P_2, P_4) и переводит объект в состояние «построен», то есть на «третью» стадию.

Пример, изображенный на Рис. 3, иллюстрирует преобразование простейшей связки «исходный объект» - «ссылка» - «вычисляемый объект» в цепочку действий в терминах сети Петри. В реальности объектно-иерархический подход не накладывает ограничений ни на количество дочерних ссылок, ни на число ссылок, указывающих на конкретный объект, поэтому граф, отображающий процесс расчетов, может состоять из множества расходящихся и сходящихся ветвей, однако, не может иметь циклов.

Динамика системы (дерева проекта) характеризуется изменениями дискретных состояний объектов. Смена стадий готовности не может происходить в произвольном порядке, а только согласно стандартным переходам, представленным ниже.

Подготовка. Переход стадий ($0 \rightarrow 1$). Осуществляется в результате установки для объек-

та метода построения, необходимых ссылочных связей, параметров расчетов.

Начало построения. Переход стадий ($1 \rightarrow 2$). Выполняется при старте функции построения объекта.

Редактирование. Переход стадий ($3 \rightarrow 2$). Происходит при внесении пользователем изменений в построенный объект. Процесс внесения изменений трактуется как построение «в ручном режиме», поэтому объект переходит в стадию (2).

Окончание построения. Переход стадий ($2 \rightarrow 3$). Осуществляется при успешном завершении функции построения или при окончании редактирования содержимого объекта.

Отмена построения. Переход стадий ($2 \rightarrow 1$). Прерывание работы функции построения в результате ошибки или команды пользователя.

Сброс. Переход стадий ($3 \rightarrow 1$). Очистка внутренних структур объекта, хранящих содержательную информацию. Единственный переход не в соседнее состояние.

Все перечисленные переходы, кроме последнего, относятся к процессу расчета геологической модели. Формирование структуры проекта, установка связей между объектами и параметров их построения, формирование последовательности вычислений и исполнение расчетных процедур – все это суть преобразования исходной информации в ее конечное модельное представление. Переход, именуемый «сброс», имеет обратный смысл – он обеспечивает удаление содержимого объекта с сохранением всех связей и параметров построения. В чем состоит необходимость сброса данных?

Иерархия объектов с заданными связями и параметрами определяет правила преобразова-

ния исходной информации в геологическую модель. При этом любой повторный расчет на основе тех же данных с заданными параметрами вычислений выдает идентичный результат. Это обстоятельство дает право утверждать о имеющемся *соответствии* геологической модели исходным данным и параметрам расчетов, и по этой же причине любые изменения исходной информации или деталей вычислений это *соответствие* нарушают. Его восстановление возможно только через повторный расчет, для чего все объекты, расположенные *вверх по иерархии*, предварительно должны перейти из стадии (3) в стадию (1).

В условиях постоянного изменения, добавления исходной информации, корректировки схемы и параметров вычислений необходимо согласованное исполнение ядром программы процессов «*построения*» и «*сброса данных*» объектов. Так можно обеспечить нахождение геолого-математической модели в актуальном состоянии, когда результаты расчетов гарантировано соответствуют исходным данным и параметрам моделирования.

В основе вычислительного ядра программного продукта GST находится дерево объектов, содержащее все необходимое для построения модели: исходные, промежуточные, результирующие данные, выраженный в ссылочных

связях алгоритм решения, а также параметры и сами функции построений. Управляющий блок, менеджер или компоновщик заданий является элементом корневого объекта дерева иерархии. В его функции входит запускать и синхронизировать процессы построения объектов и сброса результатов расчетов, а также отслеживать изменения источников исходных данных. При получении от каркаса приложения команды на построение какого-либо объекта компоновщик на основе дерева иерархии формирует задание, приводит базовые объекты в соответствие с внешними источниками данных и запускает процесс исполнения задания.

Стандарты современного программного обеспечения не предполагают блокирование работы интерфейса и ядра приложения при запуске ресурсоемких расчетных процессов. Специалист должен иметь возможность контролировать исполнение процедуры, просматривать промежуточные результаты, останавливать расчеты, параллельно работать с другими данными. Здесь исполнение функций построения происходит асинхронно, в отдельных потоках. На Рис. 4 изображена принципиальная блок-схема формирования и исполнения цепочки построения объекта.

Получение команды на построение, анализ связей и выстраивание задания, определение

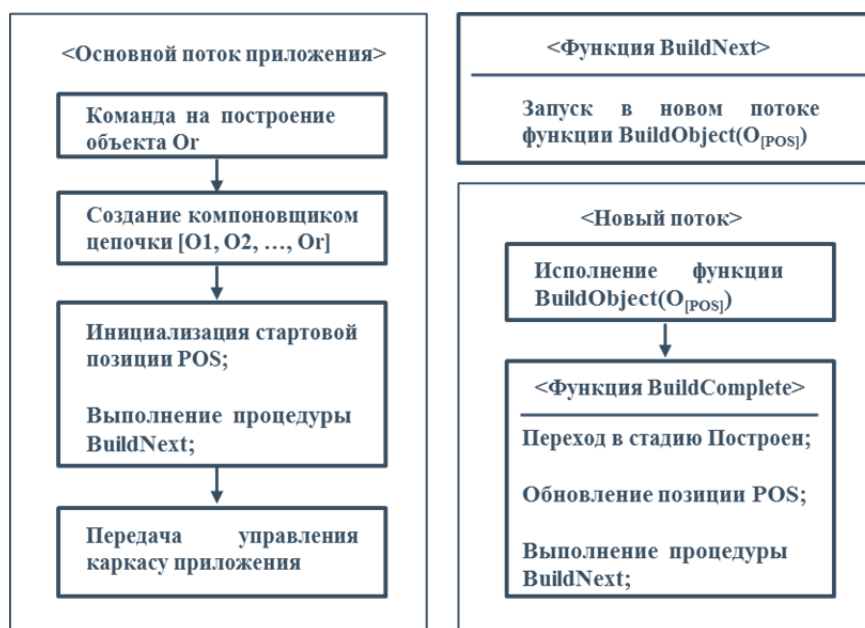


Рис. 4. Блок-схема исполнения цепочки построения объекта

стартовой позиции в цепочке для начала расчетов происходит в основном потоке программы. Внутри процедуры «**BuildNext**» асинхронно запускается новый поток, в котором выполняется функция построения объекта, а основной поток передает управление каркасу приложения. При старте функции «**BuildObject**» осуществляется переход объекта из стадии (1) в (2). При удачном завершении расчетов происходит вызов функции «**BuildComplete**», внутри которой устанавливается стадия готовности (3), обновляется текущая позиция в цепочке построения и снова осуществляется вызов функции «**BuildNext**».

На текущий момент вычислительная схема реализована так, что расчет объектов происходит последовательно – отсюда происходит термин «цепочка построения». Переход объекта в состояние «Построен» инициирует запуск расчета следующего объекта. Однако предложенная технология допускает и асинхронный расчет нескольких независимых объектов, для чего необходима небольшая модификация схемы, изображенной на Рис. 4.

Способ организации потока работ (*workflow*) в GST отличается от подходов, применяемых в ряде коммерческих программ геомоделирования, где блок автоматизации, описываемый скриптом или графом, является надстройкой над функционалом программы. В предлагаемом подходе *workflow* не требует дополнительного описания, он формируется на основе отношений между объектами и заданными параметрами расчета. Он естественным образом встроен в архитектуру проекта. Если ко всем объектам применить процедуру сброса данных, то дерево, состоящее из «пустых» объектов с установленными параметрами построения, будет представлять собой *workflow* в чистом виде. Такой «сценарий» можно сохранить, как некоторый шаблон и исполнить с другим набором исходных данных.

4. Реализация цифровой модели осадочного чехла Западной Сибири

Преимущество объектно-иерархического подхода в автоматизации задач геологического моделирования становится очевидным при созда-

нии масштабных моделей с использованием большого объема разнообразной исходной информации. Примером этого может служить детальная цифровая модель осадочного чехла по территории Западной Сибири [8, 9], разработанная и поддерживаемая в НАЦРН им. В.И. Шпильмана. Это комплексная модель, состоящая из ряда подмоделей, связанных между собой. Ее основу составляет региональный цифровой структурный каркас, характеризующий более 30 пластов и горизонтов. В областях с высокой плотностью сейсмической и скважинной информации геологическое строение описывается локальными детализированными подмоделями, гладко встроенными в региональный каркас. На базе геолого-структурного каркаса формируется его наполнение: литологические свойства, температурные модели и модели геохимических параметров [10].

При работе с крупными моделями, состоящими из набора подмоделей и подзадач, возникает необходимость многопользовательского доступа к исходным данным, алгоритмам и результатам построений. Многопользовательский режим доступа к проектам, как правило, подразумевает достаточно сложные технические решения, регламентирующие права и области ответственности пользователей. Более простой выход заключается в создании для каждой подзадачи отдельного проекта с привязкой к конкретному сотруднику. Это вполне соотносится с практическим подходом, где каждый специалист выполняет свою часть задачи, и результаты его работы поступают в качестве исходных данных для вычислений на следующем этапе. Однако здесь должна быть решена проблема оперативного обмена информацией между проектами при переходе от одного этапа к другому. В рамках объектно-иерархического подхода реализовано простое и действенное решение, основанное на свойстве уникальности объекта в пределах проекта. Сочетание «*ID+полный путь до проекта*» однозначно позиционирует объект и дает возможность обеспечить доступ к нему, минуя промежуточные файлы или рабочую базу данных. Технически это реализовано в виде специального метода построения, с помощью которого объекты большинства типов могут быть напрямую импортированы из другого проекта.

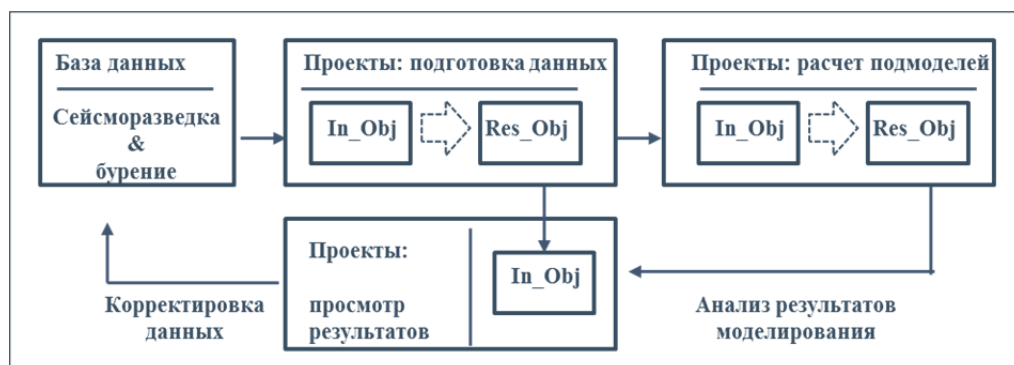


Рис.5. Принципиальная схема связанных проектов при реализации комплексной геолого-математической модели

Комплексная модель собрана по модульному принципу: она состоит из множества связанных проектов (более полусотни), в каждом из которых решается своя отдельная задача: получение информации из базы данных, ее анализ, сортировка и обработка, расчет подмоделей, подготовка результатов для анализа и оформления в виде карт или слоев для геоинформационных систем. Объекты, содержащие конечные результаты расчетов одного из промежуточных проектов, являются источниками данных для базовых объектов в проектах, используемых на следующих стадиях построения (Рис. 5). При этом передача данных из проекта в проект осуществляется автоматически. Этот подход, помимо распределения работы между специалистами, дает возможность максимально оперативно модифицировать отдельные модули (применять иные алгоритмы, уточнять, оптимизировать). Сохранив типы и идентификаторы результирующих объектов, можно без нарушения логики модели заменить один или несколько составных проектов на обновленные.

В рамках той же технологии «линковки к объектам» создаются проекты, предназначенные для просмотра и анализа текущих результатов построений. На этапе анализа специалист может принять решение о необходимости корректировки стратиграфических разбивок или сейсмической корреляции. Поступившие в базу данных изменения возвращаются в модель, управляющий блок GST производит «сброс» зависимых объектов, формирует задание, запускает поток работ, приводя, таким образом, модель в *соответствие* с исходными данными.

Заключение

Особенность представленного подхода к автоматизации задач геолого-математического моделирования заключается в том, что объект, аналог слоя данных, содержит цифровое представление элемента геологической модели, хранит, выраженный в методе и параметрах построения, фрагмент сценария решения задачи и характеризуется дискретным состоянием. Граф зависимостей, определяющий последовательность исполнения расчетов, формируется на основе ссылочных связей. В рамках этого подхода сценарий решения задачи заключен в структуре проекта и не требует дополнительного оформления в виде скрипта.

Переходы между стадиями готовности объектов характеризуют динамику исполнения потока работ. Принцип реализации компоновщика заданий допускает асинхронное, параллельное построение независимых объектов без блокирования основного потока программы. Синхронизация процессов автоматического расчета и сброса результатов позволяет поддерживать *соответствие* итоговой модели исходным данным и параметрам построения.

Объектно-иерархический подход положен в основу программного комплекса GST, специализированного под построение постоянно действующих геолого-математических моделей. Комплекс применяется в подсчете запасов, геокартингании, решении нестандартных задач геологического моделирования. Он неоднократно использовался в работе над федеральными проектами по построению и анализу

региональных геологических моделей по территории Западной Сибири.

Литература

1. Лазарев И.В., Сухорослов О.В. Использование Workflow-методологии для описания процесса распределенных вычислений. // Труды ИСА РАН, 2005, т.14.
2. Вестник Roxar. URL: http://roxar.ru/wp-content/uploads/2021/08/11_2017_noyabr_Vestnik_ROXAR.pdf (дата обращения: 11.04.2022)
3. tNavigator Дизайнер Геологии. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=174917&ARTICLE_ID=182125 (дата обращения: 11.04.2022)
4. Геокартирование на основе сплайн-аппроксимационного подхода. / Плавник А. Г., Сидоров А. Н., Сидоров А. А., Торопов Э. С. Тюмень, Изд-во ТИУ, 2021, 189 с.
5. Автоматизация технологии решения комплексных геологических задач, связанных с картопостроением. / Плавник А. Г., Сидоров А. А., Сидоров А. Н., Шутов М. С. // Математическое моделирование и программное обеспечение, 2009, т. 8, с. 25–31.
6. Свидетельство о регистрации программы GST в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2005612939. / Сидоров А.Н., Плавник А.Г., Сидоров А.А., Шутов М.С., Степанов А.В., Пономарева М.А. - 14.11.2005.
7. Мальков М.В., Малыгина С.Н. Сети Петри и моделирование. //Труды Кольского научного центра РАН. 2010, №3, с. 35–40.
8. Волков В. А., Сидоров А. А., Сидоров А. Н. Методика формирования цифровой модели ниже-среднеюрских отложений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО, 2009, т. 1, с. 87-100.
9. Сидоров А.А. О формировании цифровой постоянно действующей структурной модели осадочного чехла Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. // Геология и Геофизика, 2022, т. 63 (8), с. 1153-1166.
10. Строеение и генерационный потенциал баженовской свиты на территории центральной части Западной Сибири. / Волков В.А., Олейник Е. В., Оксенойд Е.Е., Сидоров А.А. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2016, № 3, с. 79–97.

Сидоров Андрей Андреевич. Автономное учреждение ХМАО-Югры «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпилмана», Тюмень, Россия. Зав. лабораторией, к. ф.-м. н.. Количество печатных работ: 14 (в т.ч. 1 монография). Область научных интересов: геолого-математическое моделирование, информационные технологии. E-mail: darth1975@mail.ru.

Object-Hierarchical Approach for Creating Workflows in Geo-Modeling

A. A. Sidorov

Khanty-Mansiysky Autonomous Okrug - Yugra V.I.Shpilman Research and Analytical Center for Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Russia

Abstract. An original approach to automating the solution of problems related to geo-mathematical modeling is proposed. The data space of a computational project is represented as a dynamic system consisting of related objects characterized by a set of discrete states. The relationship of dependence between objects forms a hierarchical structure, represented as a directed graph, preserving all the parameters necessary for calculations. Transitions between the objects states describe the stages of the task and provide the ability to automatically build all elements of the model. This approach is implemented in the GST software. An effective toolkit has been implemented that allows forming algorithms for solving geological problems and execute them automatically. The object-hierarchical structure of the data space ensures strict compliance of the modeling results with the calculation scheme and the source data, taking into account their periodic changes.

Keywords: Geo-mathematical modeling, object-hierarchical approach, workflow, GST, automation.

DOI 10.14357/20718632210410

References

1. Lazarev I.V., Suxoroslov O.V. Ispol'zovanie Workflow-metodologii dlya opisaniya processa raspredelenny'x vy'chislenij. // Trudy ISA RAN, 2005, t.14.
2. Vestnik Roxar. URL: http://roxar.ru/wp-content/uploads/2021/08/11_2017_noyabr_Vestnik_ROXAR.pdf (data obrashheniya: 11.04.2022)
3. tNavigator Dizajner Geologii. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=174917&ARTICLE_ID=182125 (data obrashheniya: 11.04.2022)
4. Geokartirovanie na osnove splajn-approximacionnogo podxoda. / Plavnik A. G., Sidorov A. N., Sidorov A. A., Toropov E'. S. Tyumen', Izd-vo TIU, 2021, 189 s.
5. Avtomatizatsiya tekhnologii resheniya kompleksny'x geologicheskix zadach, svyazanny'x s kartopostroeniem. / Plavnik A. G., Sidorov A. A., Sidorov A. N., Shutov M. S. // Matematicheskoe modelirovanie i programmnoe obespechenie, 2009, t. 8, s. 25–31.
6. Svidetel'stvo o registratsii programmy GST v Reestre programm dlya E'VM Federal'noj sluzhby po intelektual'noj sobstvennosti, patentam i tovarny'm znakam № 2005612939. / Sidorov A.N., Plavnik A.G., Sidorov A.A., Shutov M.S., Stepanov A.V., Ponomareva M.A. - 14.11.2005.
7. Mal'kov M.V., Maly'gina S.N. Seti Petri i modelirovanie. // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2010, №3, s. 35–40.
8. Volkov V. A., Sidorov A. A., Sidorov A. N. Metodika formirovaniya cifrovoj modeli nizhne-sredneyurskix otlozhenij Zapadno-Sibirskoj neftegazonosnoj provincii. // Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala XMAO, 2009, t. 1, s. 87-100.
9. Sidorov A.A. O formirovanii cifrovoj postoyanno deystvuyushhej strukturnoj modeli osadochnogo chexla Zapadno-Sibirskoj neftegazonosnoj provincii. // Geologiya i Geofizika, 2022, t. 63 (8), s. 1153-1166.
10. Stroenie i generatsionny'j potentsial bazhenovskoj svity na territorii central'noj chasti Zapadnoj Sibiri. / Volkov V.A., Olejnik E. V., Oksenojd E.E., Sidorov A.A. // Geologiya i mineral'no-sy'r'evy'e resursy Sibiri, 2016, № 3, s. 79–97.

Sidorov A. A. PhD, Khanty-Mansiysky Autonomous Okrug - Yugra V.I.Shpilman Research and Analytical Center for Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Russia, 75 Malygina str., Tyumen, 625026, Russia, e-mail: darth1975@mail.ru