

О ФОРМИРОВАНИИ ЦИФРОВОЙ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

А.А. Сидоров

*Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпилемана,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 75, Россия*

Представлены практические аспекты и некоторые результаты создания цифровой постоянно действующей структурно-геологической модели по территории центральной части Западной Сибири, реализованной в АУ ХМАО-Югры «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпилемана». Изложены методические вопросы применения вариационно-сеточного метода картирования, такие как выбор оптимальной расчетной сетки, использование разнородной исходной информации при построении карт по опорным сейсмическим горизонтам. Рассматривается эффективный способ использования в задачах картопостроения неувязанных сейсмических данных, который основывается на учете производных искомой функции вдоль направления сейсмического профиля, т. е. формы следа сейсмической поверхности. Отдельное внимание уделяется априорной информации при картировании стратиграфических границ, плохо обеспеченных данными сейсмической корреляции. Модель конформной мощности, связывающая форму картируемой поверхности со структурными формами двух опорных границ, прошла апробацию при построении региональных структурно-геологических моделей юрской части разреза по территории Западной Сибири. В модифицированном виде эта модель может быть применена также для картирования клиноформных пластов.

Ввиду масштабности и нестандартности задач регионального картирования подробно рассматриваются вопросы, касающиеся организации технологических расчетных циклов: алгоритмизация, протоколирование, автоматизация. Отмечается актуальность разработки специализированного программного обеспечения, и в этом качестве рассматривается программный продукт GST (Geo-Spline Technology), в котором и был реализован цифровой структурный каркас региона. Он является постоянно действующей моделью, поскольку реализованный в GST объектно-иерархический подход обеспечивает полное протоколирование всех счетных процедур и потоков данных, а также автоматизацию пересчета модели. Структурный каркас служит основой для построения карт свойств, физических параметров, работ по оценке ресурсного потенциала региона, исследований в других направлениях.

Предлагаемая модель не является окончательной, в ней заложены богатые возможности для модернизации: территориальное расширение, детализация, пополнение содержания. Этим определяются направления дальнейшего развития цифрового структурного каркаса.

Региональная геологическая модель, задача картирования, бикубические B-сплайны, структурный каркас, нефтегазоносный бассейн, постоянно действующая модель

ON THE CREATION OF A DIGITAL PERMANENTLY OPERATING STRUCTURAL MODEL FOR THE SEDIMENTARY COVER OF THE WEST SIBERIAN PETROLEUM PROVINCE

A.A. Sidorov

The paper presents some results of the development of a digital permanently operating structural and geological model (implemented at the Autonomous Institution of the Khanty-Mansiysk Autonomous District–Yugra V.I. Shpilman Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil) for the area of central West Siberia and important aspects that need to be considered in implementation practice. The methodological challenges of the variational-grid mapping method and its application include problems such as finding an optimal computational grid and using heterogeneous input information for mapping key seismic horizons. An effective method is considered for using seismic data with uncorrected misties in geological mapping based on corrections for derivatives of the desired function along the seismic profile direction (i.e., seismic surface shape). Special attention is paid to a priori information when mapping stratigraphic boundaries with poorly correlated seismic sections. The conformal thickness model linking geometry of the mapped surface with the structural framework of the two reference boundaries has been tested on the construction of regional structural and geological models for the Jurassic interval of the cross section of West Siberia. The model modification can also be applied to mapping clinoform formations.

Given the scale and non trivial tasks of regional mapping, the issues related to setting up the computing workflow are considered in detail: algorithmization, programming protocols, and automation. In the light of the accentuated relevance of the development of specialized software, the GST (Geo-Spline Technology) software product is considered, with the digital structural framework of the region implemented therein. This resulted in

a permanently operating model, since the hierarchical object-oriented approach implemented in GST ensures a complete protocol that integrates computational procedures and data flows, as well as automation of model recalculation. The structural framework serves as the basis for mapping physical properties and parameters, assessment of the region resource potential, and study of other aspects.

The proposed model being not conclusive, it offers rich opportunities for revision and refinement as to the area size (geological model domain), level of detail, database enlargement, thereby determining the directions of further development of the digital structural framework.

Regional geological model, mapping problem, bicubic B-splines, structural framework, petroleum-bearing basin, permanently operating model

ВВЕДЕНИЕ

Системное планирование геолого-разведочных работ, выделение перспективных для детальных исследований районов происходят с учетом представлений об истории геологического развития региона, условий формирования осадочной толщи, общих сведений о строении, т. е. на основе некоторой региональной модели. На первых этапах на малоизученных территориях с низкой плотностью сейсмических исследований и разведочного бурения это могут быть довольно простые модели, дающие лишь общую геологическую картину. Со временем, в ходе разведки и эксплуатации месторождений, происходит непрерывное накопление цифровой геолого-геофизической информации. Увеличение степени изученности, повышение детальности и качества геолого-разведочных работ часто приводят к существенным изменениям изначальных представлений о геологическом строении территории, что требует пересмотра региональной модели.

Многие нефтегазоносные провинции с продолжительной историей эксплуатации находятся в стадии, когда основные перспективы связываются не с крупными месторождениями, а со структурами меньшего масштаба, ловушками неструктурного типа, а также потенциалом нефтематеринских пород. Уменьшение доли «легких» запасов приводит к необходимости более тщательного планирования геолого-разведочных работ, для чего требуется обобщение накопленных знаний в единую непротиворечивую региональную модель, которая служила бы основой для изучения процессов генерации, миграции и накопления углеводородов. Это обстоятельство, а также развитие вычислительной техники делают возможными, а следовательно, актуальными исследования в направлении построения масштабных и одновременно детальных геологических моделей. Подобные работы проводятся во многих странах [Durin et al., 2006; Kenirons et al., 2009; Saleh, 2011; Jørgensen et al., 2015; Maljers et al., 2015], в том числе и в России [Волков и др., 2004а,б, 2009, 2016; Конторович и др., 2014, 2017; Брехунцов и др., 2017].

Реализация таких задач сопряжена с рядом сложностей и не в последнюю очередь с трудностью объединения в рамках единого проекта геологической информации, являющейся собственностью разных компаний и государственных фондов. Помимо важности доступности информации региональные геологические модели требуют организации масштабных интерпретационных проектов для получения увязанной сети сейсмических профилей, максимально равномерно покрывающих изучаемую территорию [Сысоев, Ухлова, 2005].

Геолого-разведочные работы в Западной Сибири проводятся более 60 лет, и за это время собран внушительный объем исходной информации, а также результатов интерпретации и моделирования. За минувшие двадцать лет был выполнен ряд работ по созданию цифровых моделей осадочного чехла. Некоторые работы проводились с помощью оригинальных, адаптированных под такие задачи, математических методов и программного обеспечения. Подход, основанный на комплексной интерпретации слабосогласованных геолого-геофизических данных, разработан в ИГНГ СО РАН и применяется для создания региональных карт по опорным реперным горизонтам, а также в модифицированном виде для картирования клиноформ неокомского комплекса [Красавчиков, 2002; Ершов и др., 2009]. Была решена важнейшая для регионального картопостроения задача гладкого сопряжения разнородной исходной информации: сейсмической, скважинной, оцифрованных изолиний, фрагментов сеток. Работы по созданию сейсмогеологического каркаса по территории Западной Сибири в 2005—2007 гг. проводились в ОАО «СибНАЦ» с использованием программного комплекса «ИнтерСейс» [Брехунцов и др., 2011]. Методика основывалась на переобработке, комплексной интерпретации и увязке большого объема исходной сейсмической информации с учетом особенностей, характерных для северных широт: наличия мерзлоты, глубокого залегания горизонтов, крутых углов падения. Трехмерная геологическая модель Ямало-Карского региона [Крылов и др., 2018] была построена на основе переинтерпретации более 80 000 погонных километров сейсмических профилей и около 500 поисково-разведочных скважин. Реализация структурного каркаса и литологической модели осуществлена в пакетах Petrel (Schlumberger) или IRAP RMS (Rohar) с использованием сеток с переменным шагом, адаптированных под переменную плотность исходных данных.

Цель данной статьи — изложение разработанной и применяемой в АУ ХМАО-Югры «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана» (НАЦРН) технологии создания цифровой структурной модели осадочного чехла по территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (ЗСНГП). Математическим ядром подхода является вариационно-сеточный метод геокартирования, основы которого были заложены в 1970-х годах в группе, работавшей под руководством А.М. Волкова [Волков, 1979, 1988; Сидоров, 1979]. Развитие возможностей вычислительной техники позволили в 1990-х годах, уже на базе НАЦРН, перейти к решению задач регионального картопостроения [Шпильман и др., 1999]. Расчеты структурной карты отражающего горизонта Б по территории ХМАО производились в программе SIGMA [Торопов, Пятков, 1986], предоставлявшей широкие возможности в использовании данных прямых наблюдений и косвенной информации. Работавшая в пакетном режиме программа SIGMA со временем перестала отвечать современным требованиям, и в конце 1990-х годов началась разработка усовершенствованного программного продукта GST (Geo-Spline Technology)¹ [Сидоров и др., 2005]. Его основу, как и прежде, составлял вариационно-сеточный метод геокартирования в обобщенной сплайн-аппроксимационной постановке [Плавник и др., 2009, 2021]. В то же время под руководством В.А. Волкова стартовали работы по обобщению геолого-геофизической информации с целью создания цифрового структурного каркаса по территории ХМАО округа и прилегающим районам ЯНАО, Томской и юга Тюменской областей. Изначально, исходя из основного направления деятельности НАЦРН, акцент делался на центральной части Западной Сибири, позже технология успешно применялась и для северных районов. В настоящий момент структурно-геологическая модель юрского интервала разреза покрывает большую часть ЗСНГП.

Под цифровым структурным каркасом (далее ЦСК) понимается комплекс структурных карт горизонтов и пластов, имеющих региональное распространение, а также увязанные со структурным планом карты толщин и границы распространения пластов. Модель изначально разрабатывалась с учетом возможности повышения ее детальности, привлечения к построениям разнородной геолого-геофизической информации, расширения области картирования, а также содержательного усложнения с включением в модель новых геологических объектов. Кроме того, была поставлена цель — обеспечить характерную для постоянно действующих моделей (ПДМ) возможность оперативного обновления при уточнении и дополнении комплекса исходных данных либо при изменении представлений о геологическом строении изучаемой территории. Для этого были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Создание методики построения детальных региональных структурных карт по опорным отражающим горизонтам с использованием максимального объема геолого-геофизической информации.
2. Создание методики построения «внутренних» стратиграфических границ, не в полной мере обеспеченных исходными данными по всей исследуемой площади, с согласованием со структурными формами опорных горизонтов. Получение непротиворечивых карт толщин пластов и комплексов, а также границ их распространения.
3. Разработка расчетных схем, подходов и программного обеспечения для управления потоками данных и синхронизации вычислений с изменениями, вносимыми в исходную сейсмическую и скважинную информацию.
4. Обеспечение оперативного доступа специалистов к результатам расчетов с целью их дальнейшего анализа.

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ПО ОПОРНЫМ ГОРИЗОНТАМ

Построение детальной структурной карты по одному или нескольким отражающим горизонтам, прослеживаемым на большей части изучаемого региона и наиболее полно обеспеченным исходными данными, является естественным стартовым шагом при создании структурно-геологической модели. В качестве таких границ в представляемой модели выбраны отражающие горизонты (Ia, Б(IIa), М и Г). Эти опорные горизонты составляют основу ЦСК: они обеспечивают согласованность внутренних стратиграфических границ, а также должную детальность структурного плана.

Вопросы детальности построений. Территория Западной Сибири характеризуется неравномерной степенью изученности, из чего следует вопрос о выборе оптимальной детальности построений. Стоит отметить, что существует немало факторов, определяющих выбор шага расчетных сеток, определяющими среди которых являются плотность исходной информации и свойства интерполирующих функций. В предлагаемом подходе оптимальный размер ячейки определяется балансом между минимизацией вычислений и детальностью построений, обеспечивающих приемлемую точность аппроксимации поверхностью третьего порядка структурных элементов, заключенных в полигоне между профилями площадных сейсмических работ. Для построения карт по данным 2D сейсморазведки в большинстве случаев достаточно сетки с шагом 1 км. Однако для горизонтов с изменчивым структурным планом,

¹ www.geo-spline.ru

например, для подошвы юрского комплекса, километровая сетка может оказаться недостаточно детальной. Многолетний практический опыт регионального картирования показал, что базовый шаг сетки 0.5 км обеспечивает, с одной стороны, должную точность, с другой — приемлемую скорость расчетов. В настоящее время этот шаг используется для всех картируемых границ.

Степень детализации построений по обширным территориям в значительной степени ограничена вычислительными возможностями компьютеров. Так, например, для обсуждаемого в статье вариационно-сеточного метода в 64-разрядной реализации предельный размер сетки, рассчитываемой в рамках одной задачи, составляет порядка 1—2 млн узлов, в то время как для покрытия территории ЗСНГП при размере ячейки 0.5 км требуется сетка с числом узлов около 20 миллионов. Стандартный выход из этой ситуации заключается в разбиении прямоугольника картирования на подобласти с расчетом в каждой из них более компактной задачи и гладким сопряжением решения с соседними подобластями [Плавник и др., 2021]. Переход к набору последовательных расчетов снижает пиковую нагрузку на ресурсы вычислительной машины, при этом эффективность и универсальность такого подхода зависит в первую очередь от технологии «сшивки» решений. Подход, реализованный в рамках вариационно-сеточного метода, основан на компактности носителя базисной функции (В-сплайна) и обеспечивает гладкую, до второго порядка включительно, склейку фрагментов карты.

Проблема согласования данных. Основной объем геофизической информации, используемой в построении ЦСК, составляет корреляция сейсмических разрезов, полученная из отчетов партий (более 2000 площадных работ в настоящее время), а также результаты комплексной переинтерпретации региональных профилей (более 60 000 км). В ходе выполнения локальных и субрегиональных проектов, как правило, происходит переобработка и переинтерпретация данных площадной сейсморазведки и их увязка с региональной сетью профилей. Тем не менее доля увязанных по единой модели результатов интерпретации мала относительно общего объема сейсмических данных. Проблематичность переобработки всего объема сейсмики заключается как в масштабах задачи, так и в недоступности первичного материала. Данные отчетов сейсмических партий собирались в течение длительного времени, а корреляция производилась независимо разными специалистами, поэтому величины невязок в крестах профилей для соседних партий нередко весьма значительны и для некоторых сейсмических границ превышают 100 мс. Тем не менее, несмотря на высокую степень несогласованности, эти данные содержат ценную информацию о структурных формах картируемой поверхности и, следовательно, должны быть учтены в модели.

Кроме сейсмических данных в построениях используются стратиграфические разбивки более 10 000 поисково-разведочных скважин, а также различная дополнительная информация: фрагменты карт в изолиниях, фрагменты сеточных моделей структурных поверхностей, границы выхода отложений на дневную поверхность и так далее.

Необходимость оперировать исходной информацией, имеющей неодинаковую степень достоверности, согласованности, отличающейся качеством и разным способом представленной, — главная особенность регионального картирования, требующая применения соответствующих математических подходов. Такие данные, собранные из различных источников, не в полной мере характеризует значения (глубины, времена) картируемых поверхностей, поэтому термин «исходная информация» должен быть интерпретирован шире, чем значения картируемого параметра в точках. В применяемом при построении модели вариационно-сеточном методе связь между исходными данными и моделируемым геологическим полем U выражается в обобщенном виде:

$$L(U) = R(G), \quad (1)$$

где G — массив исходных данных, а L, R — некоторые операторы, ставящие в соответствие трансформанты поля U с исходной информацией. Требование равенства значений картируемого поля U исходным данным G является частным случаем соотношения (1) и в принятой терминологии называется учетом данных по значениям. Расширенное представление (1) исходной информации легло в основу обобщенной сплайн-аппроксимационной постановки задачи картопостроения [Плавник, 2010]. В этой постановке L, R представляют собой линейные дифференциальные операторы второго порядка с коэффициентами, в общем случае зависящими от координат. Соотношение (1) в терминологии указанного подхода именуется «уравнением», которое определяется либо на ограниченном числе точек (локальное уравнение), либо для всей области решения (глобальное уравнение). Каждое уравнение входит в квадратичный функционал вариационной задачи с весовым коэффициентом, также в общем случае переменным, обеспечивающим должную точность соответствия картируемого поля исходным данным. Фактически обобщенная постановка объединяет понятия прямой и косвенной информации, так как формальное различие между ними заключается в форме операторов L, R .

Учет несогласованной сейсмической информации. Проблема сейсмических невязок остается одним из главных препятствий, с которым сталкиваются специалисты при решении задач регионально-

го картирования. Несоответствие между соседними профилями приводит к серьезным ошибкам аппроксимации, которые выражаются в увеличении отклонений результирующей поверхности от исходных данных, появлении ложных высокоградиентных зон и общем искажении структурного плана. Поэтому разработка эффективного алгоритма, исключающего сейсмические невязки, стала первоочередной задачей в начале работ по формированию ЦСК.

Пусть $U(x, y)$ — искомая структурная или изохронная поверхность, а $u(x_i, y_i)$ — результаты сейсмической корреляции для отдельного профиля в глубинном или временном масштабе; x_i, y_i — координаты i -го пикета. Предположим, что $u(x_i, y_i)$ отличаются от значений искомой поверхности в заданных точках на величину D , обусловленную особенностями обработки первичной информации, поправками, выбором фазы прослеживания и так далее.

$$u(x_i, y_i) = U(x_i, y_i) + D.$$

Безусловно, наиболее верным способом «обнуления» D является полная переобработка и увязка всех сейсмических данных, однако по многим причинам это может быть труднореализуемо на практике. Определение D путем минимизации суммарной невязки в крестах профилей также не дает надежного решения в первую очередь потому, что в ряде случаев профили не образуют креста. В подходе, развиваемом в НАЦРН [Волков и др., 2004а], предполагается, что для каждого отдельного профиля значения D постоянны: в таком случае для картируемого поля в точках пикетов можно задать условие, исключаяющее неизвестные величины D :

$$\frac{\partial U}{\partial x} e_x + \frac{\partial U}{\partial y} e_y = \frac{\partial u}{\partial l}, \quad (2)$$

где $\partial u / \partial l$ — значения первой производной вдоль направления профиля, вычисленные в точках сейсмических пикетов, e_x и e_y — компоненты единичного вектора, определяющего направление сейсмического профиля в данной точке. Совокупность производных $\partial u / \partial l$ для каждого профиля характеризует форму картируемой поверхности — величину, в отличие от значений глубин, инвариантную относительно статических поправок. Однако выражение (2) определяет искомую поверхность с точностью до константы, поэтому, помимо значений производных, в задаче должны присутствовать данные, определяющие абсолютные значения картируемого параметра.

На рисунке 1 приведен пример применения описанной выше процедуры: сейсмические профили из первой группы представляют собой увязанную сейсмическую корреляцию, корреляция по профилям

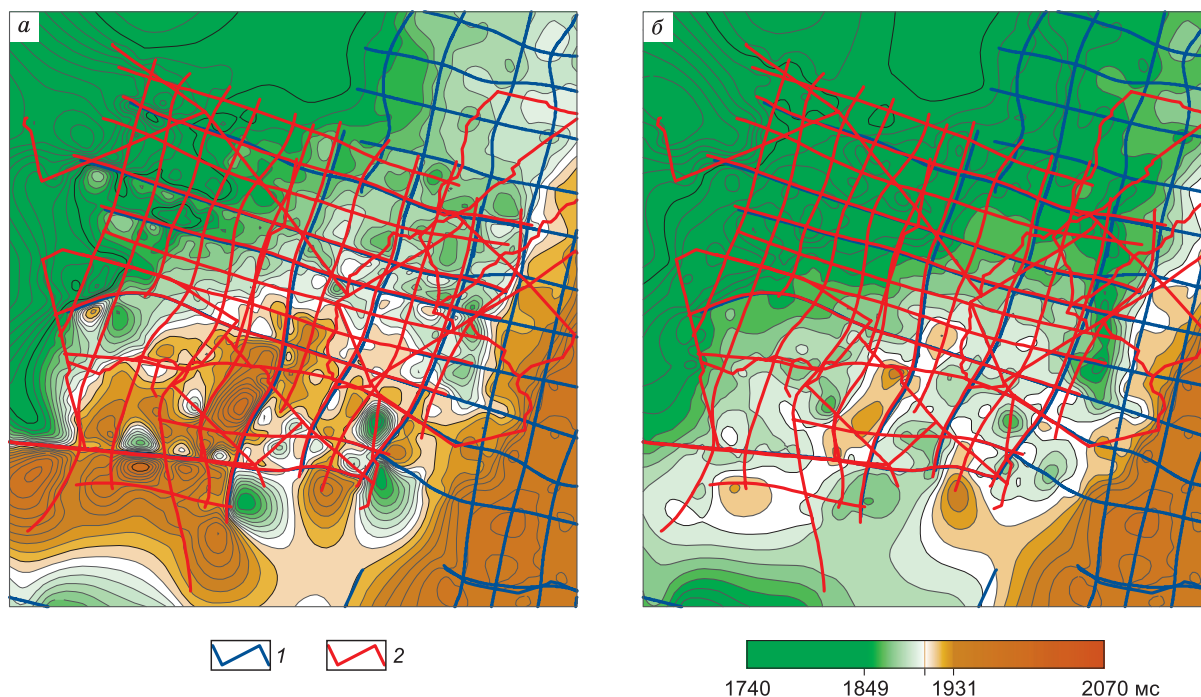


Рис. 1. Использование неувязанных сейсмических данных.

1 — увязанная сейсмическая корреляция; 2 — неувязанная сейсмическая корреляция. а — учет обеих групп данных «по значениям»; б — учет группы (1) по значениям, а группы (2) по производным.

из второй группы имеет различные невязки с основным набором данных. Результат построений, когда все данные учтены по значениям, показан на рис. 1, а: многочисленные ложные структуры, образовавшиеся по причине наличия невязок, существенным образом искажают карту. Преобразование абсолютных значений t_0 неувязанного набора данных в производные вдоль направления профилей позволяет получить более реалистичную геологическую поверхность (см. рис. 1, б).

Стоит отметить еще раз: предлагаемая технология учета несогласованных сейсмических данных ни в коем случае не отменяет важность переобработки и комплексной переинтерпретации результатов сейсмических работ. Увязанная сейсмическая корреляция является более информативной с точки зрения картопостроения, чем разрозненные данные, учтенные по модели (2), и со временем ее доля в общем массиве информации должна увеличиваться.

Учет оцифрованных изолиний и фрагментов гридов. Восстановление поверхности по данным оцифровки бумажных карт (регридинг) — актуальная составная задача регионального картирования. Она специфична крайне неравномерным расположением точек исходных данных, что создает трудности при выборе сетки и задании параметров картирования. Дополнительные сложности возникают при восстановлении сеток из изолиний ручной рисовки, поскольку они, как правило, не соответствуют стандартным применяемым в картировании принципам типа минимума кривизны. Также существенно осложняет задачу необходимость согласованного построения карты по данным оцифровки и заданным значениям в скважинах в особенности тогда, когда наблюдается несоответствие между этими группами данных.

Способность вариационно-сеточного метода принимать в качестве исходных данных значения производных картируемого поля открывает широкие возможности для решения задач коррекции оцифрованных карт по стратиграфическим разбивкам. В точках оцифровки вводится дополнительное условие:

$$\frac{\partial U}{\partial x} e_x + \frac{\partial U}{\partial y} e_y = 0. \quad (3)$$

Нулевое значение производной в направлении, определяемом единичным вектором касательной к изолинии, задает форму (только форму) структурного плана карты. Варьируя соотношение весов на значение изолинии и на уравнение (3), можно добиться строгого соответствия стратиграфическим разбивкам, максимальной близости к структурным формам оцифрованной карты и избежать артефактов картирования. В целом допустимо использовать в задаче картирования уравнение (3) и данные бурения без учета значений изолиний. Это может оказаться полезным, например, при отсутствии данных по значениям оцифрованных изолиний либо при переносе на структурный план аномалий потенциальных полей.

Совместный учет значений и производных позволяет встраивать в картируемую поверхность фрагменты сеточных моделей, предварительно преобразованных в набор регулярно расположенных точечных данных. Для каждой точки из этого набора с координатами x_i, y_i могут быть рассчитаны как значения сеточной функции $u(x, y)$, так и значения частных первых и вторых производных, а в функционал вариационной задачи вводятся три группы «локальных» уравнений нулевого, первого и второго порядков.

$$U(x_i, y_i) = u(x_i, y_i);$$

$$U_x(x_i, y_i) = u_x(x_i, y_i), U_y(x_i, y_i) = u_y(x_i, y_i); \quad (4)$$

$$U_{xx}(x_i, y_i) = u_{xx}(x_i, y_i), U_{xy}(x_i, y_i) = u_{xy}(x_i, y_i), U_{yy}(x_i, y_i) = u_{yy}(x_i, y_i).$$

Первое уравнение связи — классическое условие прохождения картируемой поверхности через заданные точки. Условие равенства первых частных производных по пространственным координатам определяет для каждой точки x_i, y_i картируемую поверхность U , равной сеточной функции u с точностью до постоянного сдвига. Третье условие, записанное для вторых производных, определяет искомую поверхность с точностью до сдвига и произвольного наклона. Все три условия могут применяться в задаче картирования одновременно с различным соотношением весовых коэффициентов, что позволяет произвести наилучшую увязку с другими, используемыми в построениях данными, например, данными бурения.

Отдельная задача — включить в цифровую модель фрагмент некоторой карты абсолютно точно, без изменений. Безусловно, можно ввести в задачу с достаточно большим весом узлы грида с заданными значениями отметок, однако здесь необходимо провести дополнительную работу, чтобы избежать конфликта данных, минимизировать влияние сглаживающего функционала и так далее. Более строгий и абсолютно точный подход к этой проблеме основан на том же принципе, что и сопряжение фрагментов грида при его построении по подобластям [Плавник и др., 2021].

Набор данных, используемый при картировании отражающих сейсмических горизонтов

Тип данных	Способ учета в модели
Фрагменты сеток для точного сопряжения с моделью	Абсолютно точное соответствие исходных сеток с картируемой в заданных узлах
«Точная» точечная информация: данные бурения, увязанная сейсмическая корреляция и т. д.	Классический учет по значениям картируемого параметра с различными весовыми коэффициентами
Неувязанная сейсмическая корреляция	Учет первых производных по направлению профиля: уравнение (2)
Оцифрованные изолинии карт	Совместный учет «по значениям» и нулевой первой производной по направлению изолинии: уравнение (3)
Фрагменты сеток для увязки с другими данными	Введение в задачу с разным соотношением весов на уравнения нулевого—второго порядка (4)

Описанные в текущем разделе категории данных сведены в таблице. Важно отметить, что вариационно-сеточный метод допускает использование информации из всех категорий одновременно, в рамках одной задачи картопостроения. Иными словами, существует возможность установить для модели требование более точного соответствия исходным данным, которые считаются наиболее достоверными, а остальная информация может учитываться менее строго. Степень строгости учета данных выражается в величине весовых коэффициентов и форме локальных уравнений связи.

ПОСТРОЕНИЕ ВНУТРЕННИХ СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ГРАНИЦ

В таблице отражен типичный набор данных, применяемый при картировании отражающих сейсмических горизонтов. Численное соотношение между объемами данных разных типов может быть различным, что, безусловно, определяет как достоверность построений, так и выбор технологической цепочки. В частности, бывают ситуации, когда по отдельным геологическим границам может иметь место существенный недостаток детальной исходной информации: в распоряжении есть только стратиграфические разбивки, и это требует ввода в модель дополнительных данных о поведении структурной поверхности между скважинами. Обычно в этих случаях применяют различные модели конформности искомой поверхности с одной или несколькими известными геологическими границами, именуемыми опорными [Patel, McMechan, 2003].

Поскольку через заданные точки можно провести бесконечное число поверхностей, удовлетворяющих локальным уравнениям, поэтому единственность решения вариационной задачи обеспечивается условиями, налагаемыми на картируемую поверхность по всей области решения — глобальными уравнениями. В общем случае глобальное уравнение имеет вид [Плавник и др., 2009, 2021]:

$$L(U) = \sum_{i=1}^n R_i(G_i),$$

$$L = a_0 + a_1 \frac{\partial}{\partial x} + a_2 \frac{\partial}{\partial y} + a_3 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + a_4 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_5 \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (5)$$

$$R = b_0 + b_1 \frac{\partial}{\partial x} + b_2 \frac{\partial}{\partial y} + b_3 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + b_4 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + b_5 \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

где $G_i(x, y)$ — функции, представляющие некоторые известные поля; коэффициенты дифференциальных операторов L, R в общем случае зависят от координат. Совокупность глобальных уравнений (5) мы называем моделью знаний о картируемом поле или априорной информацией. Линейная зависимость картируемой поверхности от грида G ($U = bG + c$ — классический тренд) является частным случаем (5). Коэффициенты c, b могут быть определены из регрессионного анализа стратиграфических разбивок или сейсмических данных; предлагаемый подход позволяет определить их автоматически в ходе решения вариационной задачи картирования.

Применение линейной зависимости между отметками кровли для конформных горизонтов достаточно распространено, однако следует отметить, что такие модели являются слишком жесткими для регионального масштаба. Так, например, по данным 8327 скважин по территории ЗСНГП при высоком коэффициенте корреляции 0.99 среднеквадратичное отклонение от линейной модели зависимости отметки кровли тюменской свиты от отметки подошвы баженовской составляет 34 м, а максимальное отклонение достигает 330 м. В этом случае все отклонения от модели сосредоточатся в окрестности скважин и будут проявляться в виде «накрученных» изолиний.

Вопрос обоснования выбора адекватной модели конформности был тщательно проработан в ходе выполнения в НАЦРН (2003—2007 гг.) ряда субрегиональных работ и регионального проекта по юрско-му комплексу. В итоге для юрских пластов, не обеспеченных детальной сейсмической информацией, была принята модель конформной мощности [Волков и др., 2004б, 2009]:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = a \frac{\partial H}{\partial x} + c_x, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = a \frac{\partial H}{\partial y} + c_y, \quad (6)$$

где H — мощность, заключенная между двумя опорными поверхностями, h — мощность (внутри интервала H) от кровли картируемого горизонта до нижней опорной границы, a — коэффициент конформности, c_x , c_y характеризуют региональный тренд изменения мощности. Коэффициенты уравнений вычисляются автоматически по скважинным данным в ходе тестового решения вариационной задачи картирования. Для юрского интервала в качестве верхней опорной границы выбирается подошва бажен-новской свиты, нижней служит подошва юры (горизонт Ia). При построении внутренних границ юрско-го комплекса последовательность вычислений идет сверху вниз — от более разбуренных пластов к менее разбуренным. На каждой итерации верхняя опорная поверхность смещается вниз.

Модель конформной мощности относительно проста, тем не менее она хорошо описывает процесс заравнивания палеорельефа, вклинивание пластов в окрестности выступов фундамента и обладает высокими прогнозирующими свойствами. На рисунке 2 показана область распространения нижнеюр-ских отложений в районе Краснотенинского свода, наложенная на карту палеоповерхности подошвы юры. Область определена по линии примыкания кровли пласта Ю₁₀ к доюрскому основанию. Карта толщин нижнеюрских отложений рассчитывалась на основе стратиграфических разбровок с использованием модели конформной мощности. На карте показаны скважины, достигшие доюрского основания, но в разрезе которых пласт Ю₁₀ не выделен: в построении карты толщин они не участвовали и выступали в качестве контрольных для оценки прогнозирующих свойств модели. В результате выполненных построений около 95 % таких скважин оказались расположенными вне области распространения пла-ста; остальные 5 %, как правило, и это видно на увеличенном фрагменте карты, находятся либо рядом с границей отложений, либо в областях малых толщин.

Модель конформной мощности (6) также может быть адаптирована к моделированию клино-формных пластов: в качестве верхней опорной границы выбирается структурная карта по отражающему горизонту М, нижняя формируется как составная поверхность из нижележащей клиноформы и кровли баженновской свиты. Если для юрской модели c_x , c_y близки к нулю, то для пластов, сформированных боковым заполнением бассейна, коэффициенты, отвечающие за региональный тренд мощности, имеют ярко выраженную зональность. В области, расположенной над шельфом нижележащей клиноформы, картирование мощности отложений происходит по «юрской модели». В склоновой части, где имеет место изменение мощности, вызванное истощением потока осадков, производится отдельная оценка коэффициентов c_x , c_y . В общем случае при криволинейной бровке шельфа величины c_x , c_y должны быть представлены в виде функций координат, однако в пределах ХМАО для большинства клиноформ с учетом среднего угла их падения они могут быть приняты константами.

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЙ

Почти за 20 лет своего существования цифровая структурная модель региона развивалась как в направлении повышения детальности, так и в сторону усложнения. Пополнение базы данных, увеличение производительности компьютеров с переходом на 64-разрядное программное обеспечение позволило двукратно детализировать сетку сплайнов до размера шага 0.5 км. Системный пересмотр разбровок по всему стволу скважин сделал возможным включение в модель новых стратиграфических границ, в результате чего в настоящий момент ЦСК содержит их более тридцати. В дополнение к структурным картам рассчитываются толщины пластов и комплексов, границы их распространения, строятся сглаженные варианты карт под заданный масштаб для отображения на бумажном носителе, а также на веб-ресурсах.

Увеличение объемов привлекаемой к построениям исходной информации и усложнение модели стимулировали разработку технологии эффективного управления потоками данных и расчетами. Для соблюдения согласованности элементов ЦСК должен быть реализован максимально автоматизированный технологический цикл, включающий выгрузку исходной информации из базы данных, ее предварительную категоризацию и обработку, расчет ЦСК, быструю передачу результатов вычислений на анализ экспертам. Подобные технологические циклы часто осуществляются в рамках технологии workflow или big loop в продуктах IRAP RMS и Petrel. Однако данное программное обеспечение разработано в первую очередь для решения задач в масштабах месторождения и трудно применимо для построения детальных региональных моделей по Западной Сибири. Формирование технологической цепочки, адап-

тированной под региональную задачу, происходит с помощью объектно-иерархического подхода, основанного на формальной типизации геологической информации [Плавник и др., 2009, 2021] и реализованного в программном продукте GST.

Применение в геоинформационных системах объектно-ориентированных подходов для оперирования большими объемами разнородных данных довольно широко распространено [Gärtner, Bergmann, 1999; Wu et al., 2005; Saha et al., 2011; Pellerin et al., 2017] и может иметь различную реализацию. Смысл

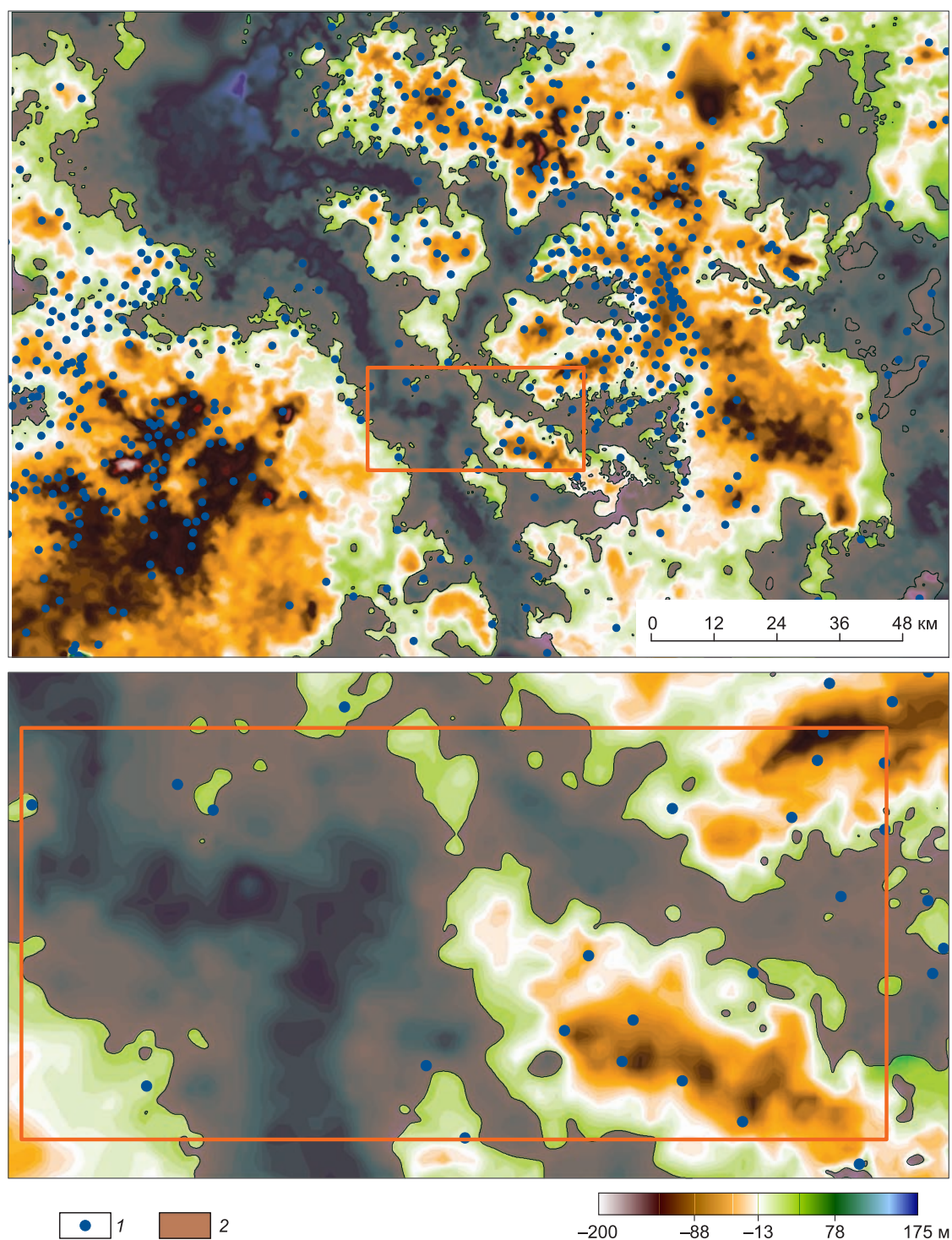


Рис. 2. Нижнеюрские отложения в районе Красноленинского свода.

1 — скважины, достигшие фундамента и не вскрывшие кровлю пласта Ю₁₀; 2 — область распространения пласта Ю₁₀. Изолинии показана палеоперевысоченность доюрского основания (выравнивание на кровлю пласта Ю₁₀).

реализованного в GST метода заключается в том, что исходная информация, промежуточные и конечные результаты расчетов находятся в определенной иерархической зависимости, образующей ориентированный граф. Вершинами графа служат объекты разных типов (таблицы, grids, полигоны и т. д.), ребра графа осуществляют связи между объектами и определяют направление движения данных при вычислениях. Это позволяет строить сложные, нестандартные расчетные схемы с полным протоколированием всех процедур и правил, по которым на основе исходной информации формируется цифровая геологическая модель. Под протоколированием понимается не чисто информационное фиксирование последовательности и параметров действий, а сохранение исполняемого программой алгоритма расчета. Совокупность взаимосвязанных объектов, помимо графа иерархии, создает рабочий поток (workflow) или цепочку построения. Применительно к ЦСК тело технологического цикла состоит из четырех основных блоков.

Блок импорта, обработки и преобразования данных. Интеграция с базами данных стратиграфии и сейсмической корреляции осуществляется с помощью специальных процедур, для которых запротоколированы все параметры (тексты запросов) доступа к информации. Это позволяет на каждой итерации рабочего цикла импортировать данные по горизонтам в автоматическом режиме без риска совершения «механических» ошибок и с минимизацией временных затрат. Обработка заключается в предварительной экспертной оценке достоверности и согласованности данных с возможным исключением части информации из расчетов либо в придании отдельным группам точек индивидуальных весовых коэффициентов. Для улучшения качества построений исключению может подлежать, например, часть перекрывающейся сейсмической корреляции или одна из двух сильносближенных скважин. Под преобразованиями понимаются различные виды пересчета данных из вида, в котором они были импортированы, в форму, необходимую для их использования в картопостроении. На этом этапе, например, значения t_0 в пикетах пересчитываются в производные вдоль направления сейсмического профиля. Важно отметить, что обработка и преобразование происходят не в «ручном» режиме, а в ходе выполнения протоколируемых процедур, что обеспечивает полную повторяемость на каждой итерации технологического цикла.

Блок расчета структурного каркаса. На основе результатов работы предыдущего блока по описанным выше методикам картирования вычисляется содержимое ЦСК. Все параметры моделирования — шаги и размеры сеток, весовые коэффициенты, уравнения связи — являются протоколируемыми величинами, гарантирующими повторяемость расчетов. Построение каждого элемента модели происходит в отдельном потоке, что позволяет производить параллельный расчет независимых элементов.

Блок доступа к результатам построений. Построение региональной цифровой модели объединяет усилия многих специалистов, занятых как непосредственно расчетами, так и анализом результатов. Кроме всего прочего анализ подразумевает оценку корректности построений с принятием решения относительно необходимости внесения изменений в скважинную или сейсмическую корреляцию, в алгоритм или параметры расчетов. Ввиду масштабности задачи качественный и оперативный анализ требуют разделения модели между специалистами как по площади, так и по разрезу, для чего необходим корректный, безопасный, совместный доступ к результатам. Блок доступа реализован на основе того же объектно-иерархического подхода: он позволяет находящимся в локальной сети специалистам через средства визуализации работать непосредственно с текущим вариантом модели, без создания копий для каждого рабочего места и минуя файловый обмен.

Блок экспорта результатов. Данный блок автоматизирует проводимые обычно вручную процедуры сохранения результатов построений в файлы обмена для дальнейшего использования либо в других пакетах, либо для передачи заказчику работ. Здесь же происходит подготовка к печати карт на бумажных носителях: сглаживание grids для оптимального отображения в заданном масштабе, трассировка изолиний, получение сглаженных границ областей распространения пластов и так далее.

Автоматизация технологического цикла помогает миновать «узкое место», связанное с передачей данных внутри и между расчетными блоками. Обмен данными между точками выхода и входа расчетных процедур происходит напрямую, без использования обменных файлов и ручных операций пользователя, что существенно экономит время специалистов и предохраняет от случайных ошибок. Этот принципиальный момент, означающий возможность автоматического прохода счетной процедуры от внесения изменений в базу данных до формирования графических слоев для ГИС систем, делает структурный каркас не «статичной», а постоянно действующей цифровой моделью региона, адаптируемой под непрерывно обновляющийся набор исходных данных.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕАЛИЗАЦИИ И АПРОБАЦИИ ЦСК

Цифровой структурный каркас, представляющий собой совокупность карт опорных сейсмических горизонтов и пластов регионального простирания, является основой, своего рода скелетом для обобщенной геологической модели, описывающей литологические, геохимические, физические свой-

ства пород осадочного чехла. В ходе работ над цифровой моделью было выделено несколько важных направлений, каждое из которых представляет собой целый комплекс задач.

Доступ к данным. Важнейший предварительный этап, без которого невозможно создание сколь-нибудь адекватной модели, включает в себя не только проблему получения данных из фондов или от недропользователей, но также вопросы организации хранения информации и доступа к ней. При проектировании структур базы данных необходимо предусмотреть возможность многовариантности результатов сейсмической корреляции или стратиграфических разбивок. Не останавливаясь подробно на деталях, имеющих исключительно технический характер, отметим преимущество прямого доступа программного обеспечения к базам данных без создания промежуточных файлов. Если не удастся полностью исключить загрузку исходной информации из файлов, необходимо обеспечить строгую схему хранения (структура папок, система имен и др.), а также не допускать неконтролируемого накопления копий и их «расползания» по рабочим местам специалистов. Соблюдение этих мер позволит существенно минимизировать временные издержки и ошибки при загрузке данных в модель.

Математические методы. Используемый при создании ЦСК вариационно-сеточный метод картирования обладает высокой эффективностью для решения задач регионального масштаба и, что существенно, позволяет учитывать разнородную геолого-геофизическую информацию. Метод достаточно универсален, так как помимо структурных построений, он применим для расчета полей свойств через задание законов их пространственного распределения в виде дифференциальных уравнений. Кроме надежного метода картирования, решение региональных задач требует создания эффективных алгоритмов для оперирования большими объемами данных. Это математические действия с сетками, геометрические операции с линиями и полигонами, операции с большими табличными данными, содержащими порядка нескольких миллионов строк и так далее.

Специализированное ПО. Задачи регионального моделирования не тривиальны. Подходы к их решению зависят от многих факторов: степени изученности территории, качества имеющейся информации, динамики ее обновления и изменения. При этом развитие компьютерных программ происходит в первую очередь в коммерчески выгодных направлениях, т. е. для целей моделирования в масштабах месторождений. По этой причине, а также ввиду набирающей силу политики импортозамещения, представляется актуальным разработка специализированного программного обеспечения для решения нестандартных задач геологического моделирования, имеющих научную и стратегическую направленность. При проектировании программного продукта необходимо опираться не только на эффективные математические методы, но изначально заложить возможность алгоритмизации, протоколирования и автоматизации расчетных процедур. Такой подход дает возможность перейти от «одноразовых» геологических моделей, построенных в полуручном режиме, к постоянно действующим моделям, обновляющимся при поступлении или изменении исходных данных.

Перечисленные выше идеи были реализованы при создании цифровой постоянно действующей модели структурного каркаса по территории центральной части Западной Сибири, а также при разра-

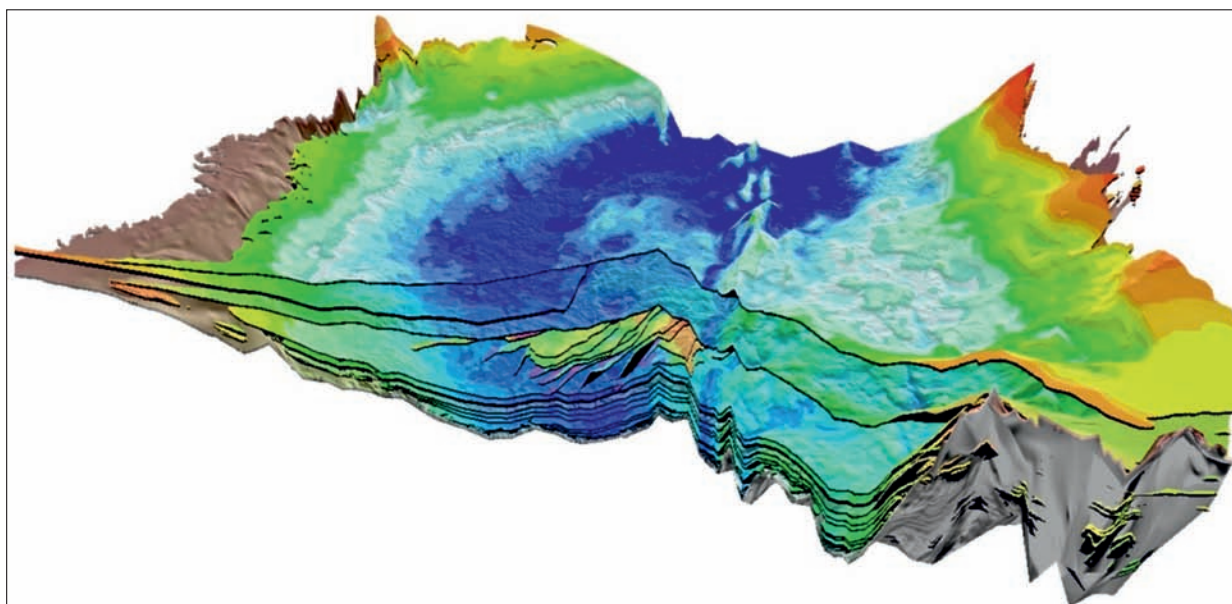


Рис. 3. Цифровой структурный каркас центральной части Западной Сибири.

ботке программы GST. Средствами этого продукта был организован технологический цикл, связывающий базы данных сейсмической корреляции и стратиграфических разбивок с расчетными проектами и далее с ГИС проектами по формированию слоев для бумажных и электронных карт, а также со средствами визуализации результатов моделирования на рабочих местах специалистов.

Цифровой каркас включает в себя структурные карты по опорным сейсмическим горизонтам, пластам юрского интервала разреза, клиноформным пластам неокома (рис. 3). При этом гибкость объектно-иерархического подхода открывает пути усложнения модели как в плане наполнения (новые горизонты, пласты, свойства), так и в смысле детализации — сопряжения локальных построений с региональным планом. Структурные карты построены в пликативном варианте, т. е. без учета дизъюнктивных нарушений, но применяемая технология позволяет моделировать и разломную тектонику через решение задачи об антиплоском сдвиге [Сидоров, Торопов, 1989; Сидоров, 2000, 2020] методом граничных интегральных уравнений.

На основе структурного каркаса происходит построение других моделей, в частности, термической модели осадочного чехла, карт литологии, геохимических параметров и минерального состава по отдельным интервалам разреза. Применяемые методы и результаты моделирования прошли апробацию в ходе выполнения ежегодных госзаданий для правительства ХМАО и федеральных заказов: построение геологической модели юрского интервала разреза по территории Западной Сибири (2007 г.); уточнение ресурсов УВ по территории Западной Сибири (2012 г.); оценка генерационного потенциала баженновской свиты (2016 г.). Выполнялись более детальные субрегиональные построения как в рамках госзадания, так и по заказу недропользователей. Некоторые результаты были опубликованы в научных журналах и докладывались на конференциях [Волков и др., 2004а,б, 2009, 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Региональное геологическое моделирование выполняет важнейшую роль при принятии стратегических решений относительно проведения геолого-разведочных работ и оценки ресурсного потенциала территорий. Этим объясняется возрастающий интерес к подобным исследованиям как от компаний нефтегазового сектора, так и со стороны государства. Стремительное развитие вычислительных мощностей и информационных технологий диктует новые требования к региональным цифровым моделям: они должны отражать не только общие закономерности геологического строения территории и служить базой для планирования дальнейших исследований — востребованным становится движение в обратном направлении. Результаты детальных геолого-разведочных работ должны уточнять региональную модель, и, в конечном счете, цифровая модель территории обязана максимально полно соответствовать всему массиву исходной геологической информации.

Такие задачи, как правило, не стандартны, поскольку подходы к их решению существенным образом определяются размерами, изученностью территории, структурой массива исходных данных, качеством и уровнем согласованности информации. По этой причине, а также ввиду общей направленности государственной политики на импортозамещение, остается актуальной необходимость разработки и совершенствования математических методов картирования, позволяющих оперировать разнородной исходной информацией, а также специализированных программных средств, обеспечивающих алгоритмизацию и автоматизацию расчетов.

В данной работе обозначены основные задачи, выявленные на основе многолетнего опыта геолого-математического моделирования, также приведены методы их решения, доказавшие свою эффективность. Реализация вариационно-сеточного метода геокартирования в рамках объектно-иерархического подхода позволяет решать комплексные и масштабные задачи, такие как создание цифрового структурного каркаса (ЦСК) для центральной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Каркас представляет собой постоянно действующую цифровую геологическую модель, элементы которой находятся в заданной иерархической зависимости друг с другом. Объектно-иерархический подход связывает счетные процедуры в единый автоматизированный алгоритм, контролирующий построение модели от запроса в базу данных до формирования отчетных графических слоев для ГИС. В настоящее время происходит регулярное уточнение цифровой модели при поступлении новой сейсмической или скважинной информации, при этом ее архитектура допускает возможность более глубокой модернизации.

ЛИТЕРАТУРА

Брехунцов А.М., Монастырев Б.В., Нестеров И.И. (мл.). Закономерности размещения залежей нефти и газа Западной Сибири // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (8), с. 1001—1012.

Брехунцов А.М., Нестеров И.И. (мл.), Нечипорук Л.А. Современное состояние и перспективы освоения ресурсов нефти и газа юрских горизонтов Западной Сибири в свете прогнозов академика И.М. Губкина // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (3—4), с. 445—454.

Волков А.М. Построение карты — вариационная задача // Геология и геофизика, 1979 (1), с. 60—65.
Волков А.М. Геологическое картирование нефтегазоносных территорий с помощью ЭВМ. М., Недра, 1988, 221 с.

Волков В.А., Мухер А.Г., Гончарова В.Н., Нечаева Н.А., Сидоров А.А., Сидоров А.Н. Методика построения карты изохрон отражающего горизонта А и структурной карты поверхности доюрского основания осадочного чехла территории ХМАО // Вестник недропользователя ХМАО, 2004а, № 14, с. 54—61.

Волков В.А., Мухер А.Г., Кулагина С.Ф., Судат Н.В., Судат Л.Г., Сидоров А.А., Сидоров А.Н., Тугарева А.В., Гончарова В.Н. Новые данные о строении и перспективах нефтегазоносности нижнесреднеюрских отложений в пределах Помутской зоны // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО, 2004б, т. 1, с. 33—45.

Волков В.А., Сидоров А.А., Сидоров А.Н. Методика формирования цифровой модели нижне-среднеюрских отложений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО, 2009, т. 1, с. 87—100.

Волков В.А., Олейник Е. В., Оксенойд Е.Е., Сидоров А.А. Строение и генерационный потенциал баженковской свиты на территории центральной части Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2016, № 3, с. 79—97.

Ершов С.В., Букреева Г.Ф., Красавчиков В.О. Компьютерное моделирование геологического строения клиноформного комплекса неокома северных и арктических районов Западной Сибири // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (9), с. 1035—1048.

Конторович В.А., Лапковский В.В., Лунев Б.В. Модель формирования неокомского клиноформного комплекса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с учетом изостазии // Геология нефти и газа, 2014, № 1, с. 65—72.

Конторович В.А., Аюнова Д.В., Губин И.А., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Конторович А.Э., Малышев Н.А., Скворцов М.Б., Соловьев М.В., Сурикова Е.С. История тектонического развития арктических территорий и акваторий Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (3—4), с. 423—444.

Красавчиков В.О. Комплексная интерпретация слабо согласованных геолого-геофизических данных при построении региональных структурных карт (на примере осадочного чехла Западно-Сибирской плиты) // Геология и геофизика, 2002, т. 43 (5), с. 456—469.

Крылов Д.Н., Поляков Е.Е., Пылёв Е.А., Пятницкая Г.Р., Скоробогатов В.А. Региональное геологическое моделирование как средство повышения эффективности поисково-разведочных работ // Вести газовой науки, 2018, т. 3, № 35, с. 118—131.

Плавник А.Г. Обобщенная сплайн-аппроксимационная постановка задачи картирования свойств геологических объектов // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (7), с. 1027—1037.

Плавник А.Г., Сидоров А.А., Сидоров А.Н., Шутов М.С. Автоматизация технологии решения комплексных геологических задач, связанных с картопостроением // Математическое моделирование и программное обеспечение, 2009, т. 8, с. 25—31.

Плавник А.Г., Сидоров А.Н., Сидоров А.А., Торопов Э.С. Геокартирование на основе сплайн-аппроксимационного подхода. Тюмень, Изд-во ТИУ, 2021, 189 с.

Сидоров А.А. Компьютерная модель упруго-хрупкого разрушения горных пород. // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (12), с. 1798—1803.

Сидоров А.А. Учет дизъюнктивных нарушений в задачах геокартирования с использованием метода граничных интегральных уравнений // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2020, т. 6, № 2, с. 110—126.

Сидоров А.Н. Метод оптимального построения карт геологических параметров с точки зрения интерполирующих и сглаживающих сплайнов // Проблемы нефти и газа Тюмени, 1979, № 42, с. 12—24.

Сидоров А.Н., Торопов С.В. Моделирование структурных поверхностей, осложненных дизъюнктивными нарушениями, методом граничных интегральных уравнений // Строение земной коры Западной Сибири. Тюмень, ЗапСибНИГНИ, 1989, с. 90—96.

Сидоров А.Н., Плавник А.Г., Сидоров А.А., Шутов М.С., Степанов А.В., Пономарева М.А. Свидетельство о регистрации программы GST в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2005612939 от 14 ноября 2005 г.

Сысоев А.П., Ухлова Г.Д. Объемные сейсмогеологические модели — современный формат представления геологических моделей регионального уровня // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2005, т. 12, с. 34—43.

Торопов С.В., Пятков В.И. Программа совместного моделирования геолого-геофизических поверхностей // Труды ЗапСибНИГНИ, Тюмень, 1986, вып. 221, с. 34—44.

Шпильман В.И., Солопахина Л.А., Пятков В.И. Новая тектоническая карта центральных районов Западной Сибири // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО, 1999, с. 96—115.

Durin E.J.T., Doornenbal J.C., Rijkers R.H.B., Verbeek J.W., Wong T.E. Subsurface structure of the Netherlands — Results of recent onshore and offshore mapping // Geol. Mijnbouw/Neth. J. Geosci., 2006, v. 85 (4), p. 245—276.

Gärtner H., Bergmann A. Object-oriented modeling of geodata as a basic tool for the integration of heterogeneous paleoecological information // Geocomputation, 1999, v. 27, p. 975—985.

Jørgensen F., Høyer A.S., Sandersen P.B.E., He X., Foged N. Combining 3D geological modelling techniques to address variations in geology, data type and density — An example from Southern Denmark // Comput. Geosci., 2015, v. 81, p. 53—63.

Kenirons M., Curran O., Cuniffe J., Ryan J., Ryan P., Shearer A. The MarineGrid project in Ireland with Webcom // Comput. Geosci., 2009, v. 35 (2), p. 205—213.

Maljers D., Stafleu J., Meulen M.J. Van Der, Dambrink R.M. Advances in constructing regional geological voxel models, illustrated by their application in aggregate resource assessments // Geol. Mijnbouw/Neth. J. Geosci., 2015, v. 94 (3), p. 257—270.

Patel M.D., McMechan G.A. Building 2-D stratigraphic and structure models from well log data and control horizons // Comput. Geosci., 2003, v. 29 (5), p. 557—567.

Pellerin J., Botella A., Bonneau F., Mazuyer A., Chauvin B., Lévy B., Caumon G. RINGMesh: A programming library for developing mesh-based geomodeling applications // Comput. Geosci., 2017, v. 104, p. 93—100.

Saha K., Wells N.A., Munro-Stasiuk M. An object-oriented approach to automated landform mapping: A case study of drumlins // Comput. Geosci., 2011, v. 37 (9), p. 1324—1336.

Saleh S. Subsurface structural mapping of Northern Nasser Lake region, Aswan, Egypt, using Bouguer data // Contrib. Geophys. Geod., 2011, v. 41 (1), p. 45—72.

Wu Q., Xu H., Zou X. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration // Comput. Geosci., 2005, v. 31 (1), p. 35—43.

*Поступила в редакцию 11 февраля 2021 г.,
принята в печать 25 мая 2021 г.*