

УДК 550.8.053

Т.П. Широкова¹, И.В. Лыгин², Т.Б. Соколова³

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАЗНЫХ ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЯХ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

На реальных примерах исследованы возможности сейсмогравитационного моделирования для территорий, отличающихся физико-геологическим строением, масштабом исследований, степенью изученности. Показано, что полностью формализовать единый подход к построению сейсмоплотностной модели невозможно, так как методика моделирования неизбежно меняется в зависимости от физико-геологической ситуации, полноты и качества априорных данных. На результативность сейсмогравитационного моделирования влияют как геологические особенности разреза (степень расчлененности рельефа отражающих горизонтов, контрастность и глубина залегания плотностных границ, сложность геологического развития региона), так и методические параметры съемок.

Ключевые слова: гравиразведка, интерпретация, моделирование, сейсмогравитационное моделирование.

Using real-world examples, we studied the seismic-gravity modeling possibilities for territories that differ in the features of the physical and geological structure, in the scale of research, and in the exploration degree. It has been shown that it is impossible to formalize a unified approach to the construction of a seismic-density model — the modeling method inevitably changes according to the physical and geological situation, the volume and quality of a priori data. The effectiveness of seismic-gravity modeling is reacting both on the geological features of the cross-section: the extent of compartmentalization of the reflector horizons' geometry, the contrast and depth of the density boundaries, the intricacy of the geological history of the region, and the survey methodological parameters.

Keyword: gravity, interpretation, modeling, seismic-gravity modeling.

Введение. Теория и практика комплексной интерпретации сейсморазведочной и гравиметрической информации — сейсмогравитационного моделирования — имеет достаточно длинную историю [Романюк, 2012]. Она начинается с основополагающих работ Г.А. Гамбурцева, В.Н. Страхова [Страхов и др., 1989], Е.Г. Булаха [Булах и др., 1976], Г.Я. Голиздры [Голиздра, 1988], В.И. Старостенко [Старостенко, 1981], А.И. Корбунова [Корбунов, 1980], А.С. Алексеева [Алексеев, Бубнов, 1981] и других.

Особенности современного этапа сейсмогравитационного моделирования, существенно повысившие эффективность применения гравиразведки и ее роль в комплексе геолого-геофизических работ при изучении осадочных разрезов, обусловлены значительным развитием как гравиразведки, так и сейсморазведки:

— увеличением точности гравиметрии до микрогальванического уровня (в 20–30 раз: 5–10 мГал вместо 0,2–0,3 мГал) и увеличением детальности;

— повышением качества сейсморазведочных работ (с относительным увеличением производ-

ственных объемов 3D съемок) на всех стадиях реализации метода — от регистрации до обработки и интерпретации волновых полей;

— разработкой на базе современной вычислительной техники интерактивных алгоритмов решения прямой задачи гравиметрии для больших массивов данных.

Множество современных авторов занимаются вопросами сейсмогравитационного моделирования. В частности, в работах В.Р. Мелихова [Мелихов и др., 2011], И.В. Ладовского [Ладовский и др., 2013], Д.А. Даудиной [Даудина и др., 2014], В.Н. Глазнева [Глазнев и др., 2015], Е.А. Мельника [Мельник и др., 2016] и других приведены различные способы построения 2D и 3D сейсмоплотностных моделей. Показано, что привлечение данных гравиразведки в комплексе геофизических методов может повысить достоверность сейсмической инверсии. Приведены возможности метода при картировании структурных областей, уточнении информации о литологическом строении, плотности пород и скорости сейсмических волн в стратиграфических комплексах. Один из ин-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант; *e-mail*: tpshirokova@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: ivanlygin@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: tb-sokolova@yandex.ru

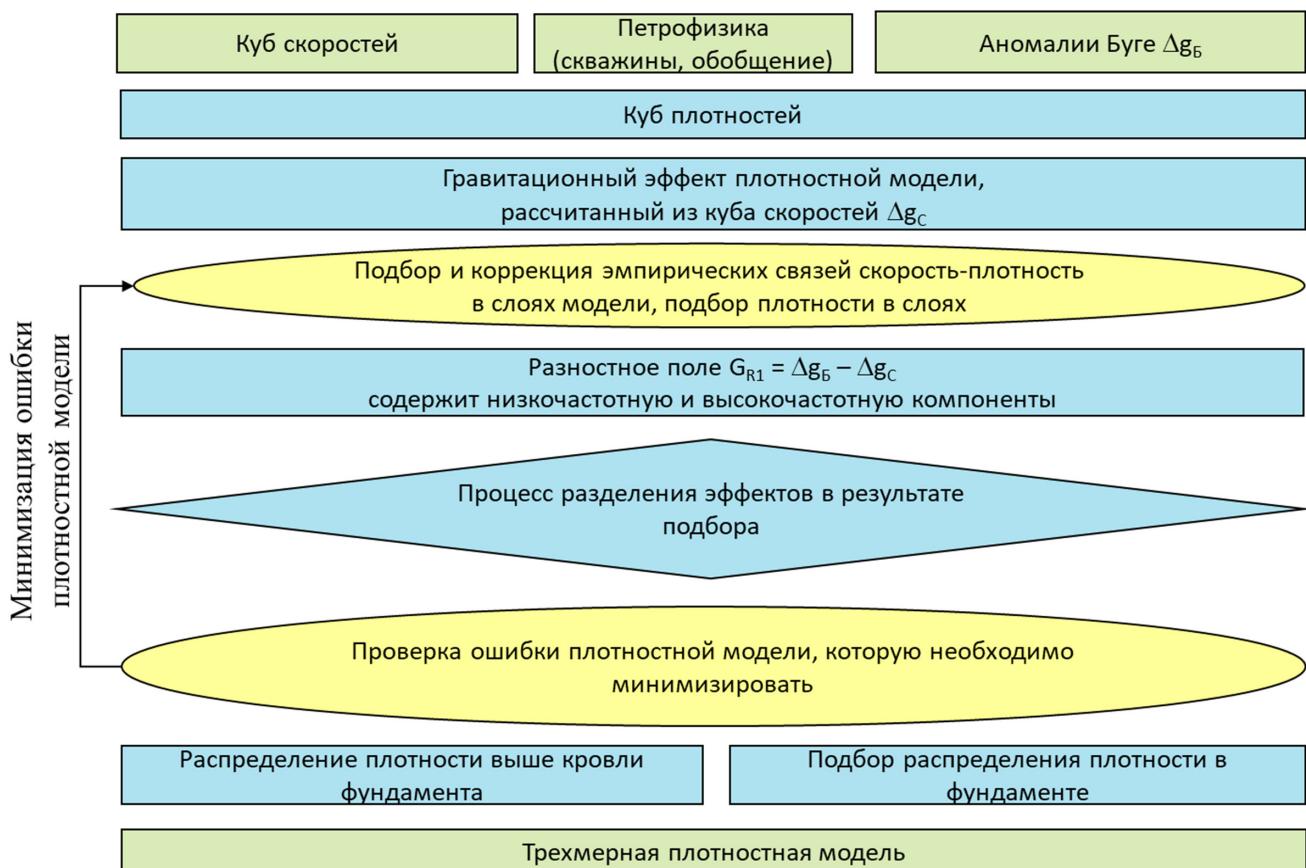


Рис. 1. Обобщенная блок-схема (граф) процесса плотностного моделирования, по [Кривошея и др., 2019]

тересных методов, описанных современными авторами, — совместная инверсия данных гравиразведки и сейсморазведки [Глазнев и др., 2015].

На основе обобщения результатов предшественников и собственного опыта составлен обобщенный граф сейсмогравитационного моделирования (рис. 1) [Кривошея и др., 2019]. Граф представляет собой основу алгоритма, реализация которого может быть использована для автоматизации процесса и создания соответствующего программного приложения. Однако получить эффективное решение таким путем можно лишь в исключительных случаях, когда гравитационные эффекты всех структурных этажей можно разделить с помощью покомпонентного анализа.

Внедрение сейсмогравитационного моделирования в практику поисковых работ показало, что в реальных ситуациях методика и подходы к решению этой задачи неизбежно меняются. С точки зрения дальнейшего развития метода весьма актуальным представляется обобщение опыта, выявление факторов, влияющих на выбор методики и эффективность сейсмогравитационного моделирования, создание рекомендаций по методике совместной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных в разных физико-геологических ситуациях, которым посвящена статья.

Использование методики моделирования для различных физико-геологических ситуаций поможет

созданию и развитию новых подходов к автоматизации процесса, более эффективных с геологической точки зрения, и созданию усовершенствованных технологий для анализа полей, геологических и петрофизических данных и непосредственно сейсмогравитационного моделирования.

Материалы и методы исследования. Фактическим материалом для анализа специфики процесса интерпретации и эффективности комплекса стали результаты практических работ, реализованных на территориях, отличающихся особенностями физико-геологического строения, масштабом исследований, объемом априорных геологических и петрофизических данных. Использован многолетний опыт авторов, полученный при выполнении среднемасштабных комплексных геолого-геофизических работ на площади Енисей-Хатангского прогиба (разломно-блоковое строение, зона активного рифтинга, глубина исследования до 40 км), средне- и крупномасштабных исследований на акваториях и шельфе Северного Ледовитого океана (крупные прогибы, разломно-блоковые, складчато-надвиговые структуры, глубина исследования от 5 до 20 км), средне- и крупномасштабных комплексных геолого-геофизических работ в Восточной Сибири (разломно-блоковое строение, глубина исследования до 4 км) и в европейской части России (Волго-Уральская антеклиза, глубина

исследования до 4 км), региональных и среднемасштабных исследований на шельфе Индийского океана, крупных материковых осадочных бассейнов Ганга, Бенгалии и др.

Моделирование рассмотрено на примере трех территорий, на взгляд авторов, типичных, базовых представителей трех основных типов физико-геологических моделей, для которых эффективно применение покомпонентного подхода к интерпретации [Лыгин и др., 2017; Соколова и др., 2019; Широкова и др., 2020]. Для каждого типа поэтапно описаны ход интерпретации, полученные 3D модели и их результативность. Проанализированы общие закономерности структуры процесса создания 3D плотностной модели и дана оценка геологической информативности решений. Ситуации, в которых покомпонентный подход не эффективен из-за физико-геологических особенностей территории (в частности, области развития обширных трапповых толщ либо субвертикальных плотностных неоднородностей с значительным распространением на глубину) или методических параметров съемки, здесь не рассматриваются, так как они требуют специального дополнительного анализа.

В качестве рабочих инструментов 2D и 3D плотностного моделирования использованы стандартные модули программного обеспечения Geosoft Oasis montaj, использующие аппроксимации объектов телами с постоянной плотностью. При необходимости учета линейных изменений плотности в слое внедрялись специализированные программы, созданные с учетом конкретных запросов геологической концепции.

Технология моделирования меняется от конкретной физико-геологической ситуации, набора и качества исходных данных, однако в большинстве случаев использовали:

- модуль Magmap программного обеспечения Geosoft Oasis montaj для покомпонентного анализа и разделения полей;
- модули работы с базами данных для пересчета скоростных кубов в плотностные и обратно;
- модули GMSYS 2D и GMSYS 3D для 2D и 3D сейсмогравитационного моделирования соответственно.

Методика исследования. Один из популярных методов, применяемых в гравиразведке для изучения геологического строения осадочных толщ, — сейсмогравитационное моделирование. Практика показывает, что подход к созданию модели, алгоритмы и методики далеко не всегда полностью соответствуют обобщенному графу интерпретации, приведенному на рис. 1 [Кривошея и др., 2019]. Модификации и подходы существенно зависят от множества факторов: геологического строения и структурной сложности среды, истории геологического развития, вида и полноты информации о плотностных и скоростных параметрах разреза, объема и качества исходных априорных данных.

Анализу особенностей методики сейсмогравитационного моделирования и приемов, обеспечивающих эффективное решение геологических задач в различных ситуациях, посвящена работа авторов. Ее целью стало рассмотрение на реальных практических примерах трех типовых геологических ситуаций, подходов и методик составления сейсмоплотностных моделей, обеспечивших решение геологических (как следствие и поисковых) задач в разных геолого-геофизических условиях.

Сейсмогравитационное моделирование осадочного бассейна в зоне активного рифтинга на примере Енисей-Хатангского регионального прогиба. Существенное отличие частотных характеристик гравитационного эффекта от глубоко залегающих структур основания (домезозойских) и структур платформенного этапа развития позволяет на базе покомпонентного анализа однозначно разделить гравитационные эффекты от трех основных структурных этажей.

Енисей-Хатангский региональный прогиб сложен двумя главными комплексами — пассивно-окраинным палеозойским и платформенным (плитным, пострифтовым) среднетриасово-юрско-меловым, разделенными локальным пермо-триасовым рифтовым комплексом (структурой) [Афанасенков и др., 2017].

Анализ априорных данных и выбор стартовой модели. Енисей-Хатангский региональный прогиб (ЕХРП), как ключевая структура северного обрамления Сибирской платформы, имеет весьма сложное геологическое строение. Благодаря комплексным геолого-геофизическим исследованиям последних лет и интегральному подходу к интерпретации данных получены новые представления о тектонике, истории развития и нефтегазоносности региона [Афанасенков и др., 2017].

Физико-геологическую модель структуры можно представить в виде прогиба, заполненного мощной осадочной толщей (рис. 2), причем верхняя часть осадочного комплекса субгоризонтально-слоистая, относительно слабо дифференцирована в плотностном отношении по латерали (пассивно-окраинный комплекс).

Основными блоками исходной информации для создания объемной сейсмоплотностной модели стали (табл. 1):

структурный каркас мезозойско-кайнозойских отложений ЕХРП по результатам сейсморазведочных работ по регулярной сети профилей (2D сейсморазведка);

актуализированные карты гравитационного и магнитного полей;

сведения о плотности осадочных отложений по данным бурения и каротажа 13 скважин, расположенных непосредственно на территории работ;

результаты ретроспективного обобщения и геологического доизучения территории [Афанасенков и др., 2017; Лыгин и др., 2017].

Рис. 2. Обобщенная модель осадочного бассейна в зоне активного рифтинга

Основные структурные комплексы	Глубина залегания, км	Плотностная дифференциация (качественно)	Схематичное изображение физико-геологической модели
1. Платформенный (Т ₂ –К)	до 0,5–1	средняя	
2. Складчато-блочный палеозойский	1–3	средняя	
3. Архейско-протерозойский фундамент	21–25	низкая	
4. Локальный рифтовый	>25	высокая	

Таблица 1

Методические параметры исходных данных (пример 1)

Число скважин		Обеспеченность геофизическими данными		
Общее	Каротаж плотности	Примечания	Сейсморазведка	Гравиразведка
13	13	в пределах исследуемой площади	псевдорегулярная сеть 2D профилей, выполненных ранее и новых	актуализированные цифровые модели, по детальности соответствующие масштабу 1:200 000

По данным каротажа построен первичный геоплотностной разрез в предположении постоянной плотности в пределах стратиграфических отделов (рис. 3).

Для плотностного моделирования в масштабе 1:200 000 необходим учет регионального гравитационного влияния толщ до глубины около 50 км. Априорных данных о плотности на такую глубину не обеспечивает ни бурение (максимальная глубина 4 км), ни сейсморазведка (МОВ-ОГТ до глубины 15–17 км). Поэтому для определения первичных плотностных характеристик модели в нижележащих слоях использовано интерактивное 2D моделирование (модуль GM-SYS 2D, Geosoft Oasis Montaj) по региональным профилям, пересекающим территорию исследования. Плотностной моделью нулевого приближения стала послойная модель с постоянной плотностью в слое.

Построение трехмерной плотностной модели EXP. Общая схема построения трехмерной сейсмоплотностной модели EXP представлена на рис. 4. Априорные данные условно можно разделить на четыре группы: структурные отражающие горизонты, аномальное гравитационное поле, а также петрофизические (плотностной каротаж) и геологические данные.

Исходное гравитационное поле (рис. 5, А) с помощью покомпонентного анализа (рис. 5, Б) может быть однозначно разделено на высокочастотную (ВЧ), среднечастотную (СЧ) и низкочастотную (НЧ) компоненты. Предполагается, что НЧ-компоненты соответствует гравитационному эффекту фундамента, СЧ компонента — нижней части осадочного чехла, а ВЧ — верхней части осадочного чехла.

Итогом сеймогравитационного моделирования стала трехмерная плотностная модель EXP [Лыгин и др., 2017]. В результате 3D сейсмогравитационного моделирования уточнена морфология ряда сейсмостратиграфических поверхностей. В верхней части земной коры зафиксированы области повышенных значений плотности, распределение которых отражает сложную динамику развития рифтовой системы [Афанасенков и др., 2017; Лыгин и др., 2017].

Сейсмогравитационное моделирование осадочного бассейна в складчато-надвиговой зоне на примере структур Печорского моря. Анализ априорных данных и выбор стартовой модели. Основные особенности строения территории — четыре структурных этажа, сложнодислоцированный разрез с унаследованными структурами в чехле — обусловлены ее положением в зоне тектонических деформаций, начавшихся с каледонской фазы тектогенеза в перми, когда инверсионные процессы, развивавшиеся в режиме сжатия, изменили рельеф раннепалеозойских структур, и наиболее активно проявились в конце триаса–ранней юре мощным тангенциальным сжатием (рис. 6). Сложность тектонического строения площади подтверждается структурой региональных потенциальных полей, в которой четко проявлены основные тектонические блоки региона и разломы.

Источником информации для построения плотностной модели нулевого приближения послужили (табл. 2): априорная геологическая концепция, данные плотностного и акустического каротажа, отражающие горизонты по сейсморазведке 3D и скоростные параметры разреза. Подбор эмпирической зависимости скорость–плотность выполнен по данным плотностного и акустического каротажа скважин, расположенных за пределами участка в своде аналогичной структуры [Соколова и др., 2019].

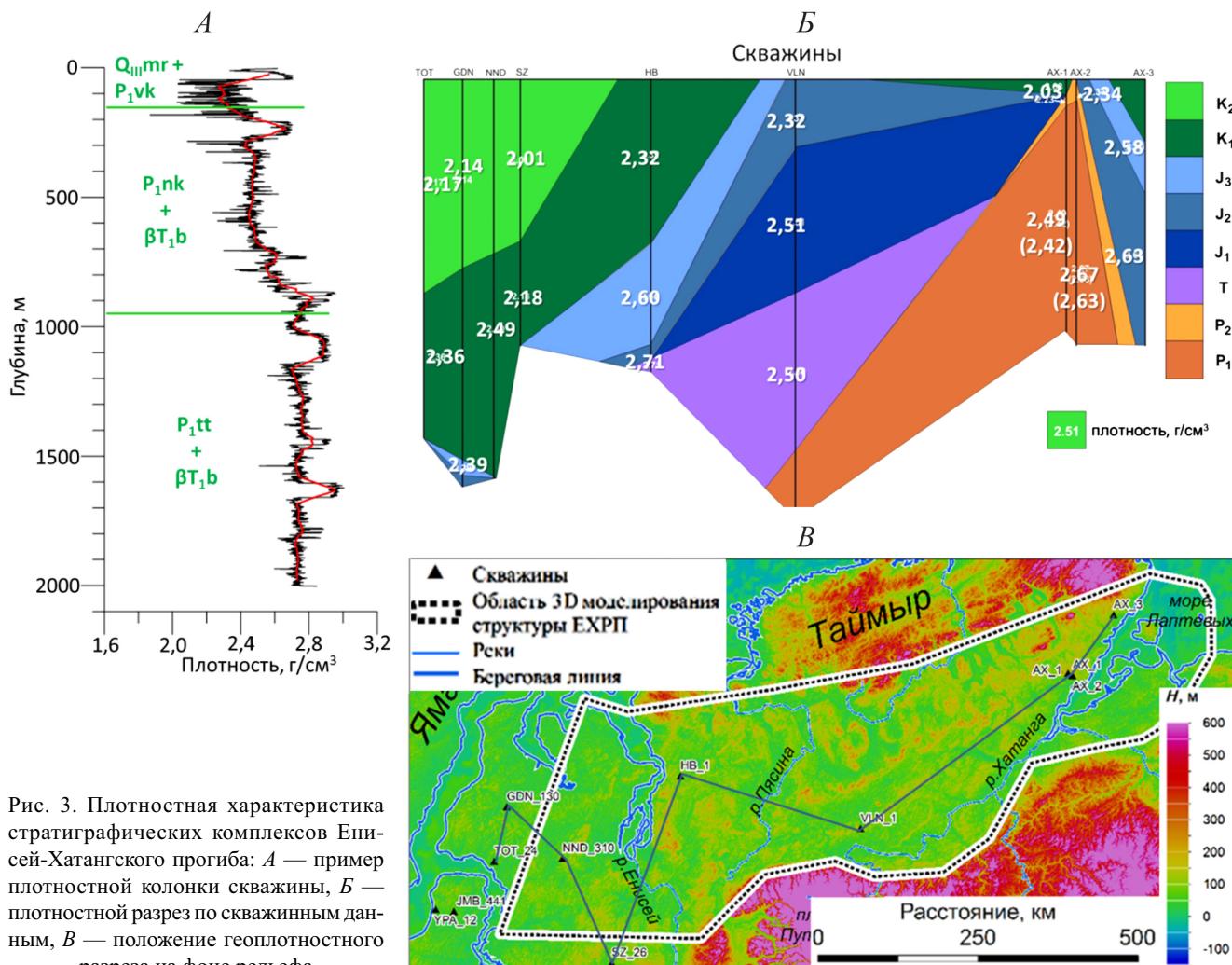


Рис. 3. Плотностная характеристика стратиграфических комплексов Енисей-Ханганского прогиба: *А* — пример плотностной колонки скважины, *Б* — плотностной разрез по скважинным данным, *В* — положение геоплотностного разреза на фоне рельефа

Таблица 2

Методические параметры исходных данных (пример 2)

Число скважин		Сейсморазведка	Гравиразведка
Общее	Каротаж плотности		
6	6	за пределами исследуемой площади, из них 4 на продолжении структуры	3D сейсморазведка, современная съемка
			высокоточная детальная в комплексе с 3D сейсморазведкой

В соответствии с сейсмической моделью и геологическими условиями выбраны 4 слоя, отличающихся по литологическому составу, для трех из них подбираны коэффициенты полинома второй степени эмпирической зависимости скорость–плотность аналогично формулам Гарднера [Gardner et al., 1974]. Четвертый (верхний) слой не представлен в скважинах, зависимость скорость–плотность для него выбрана согласно общим закономерностям, типичным для основных литологических разностей.

В процессе моделирования редактировались эмпирические зависимости скорость–плотность для каждого комплекса. Для этого скоростной куб пересчитывали в плотностной (для каждого из трех комплексов по отдельной формуле), рассчитывали гравитационный эффект, в процессе подбора уточняли зависимость на основе минимизации невязки исходного и рассчитанного полей.

Построение трехмерной плотностной модели. Литологическая неоднородность многокилометровых осадочно-терригенных толщ приводит к тому, что гравитационные эффекты от базовых комплексов близки по частотному составу. Эти эффекты в модели нулевого приближения разделены в соответствии с экспертной оценкой интерпретаторов, а в ходе итерационного подбора уточнены, т. е. получена плотностная характеристика комплексов. Общая схема построения 3D сейсмоплотностной модели показана на рис. 7.

Геологическая концепция по сейсмическим данным фиксирует в осадочном чехле унаследованные структуры фундамента. Подчеркнем, что при этом уже на стадии создания сейсмоплотностной модели нулевого приближения возникла необходимость итерационного подбора.

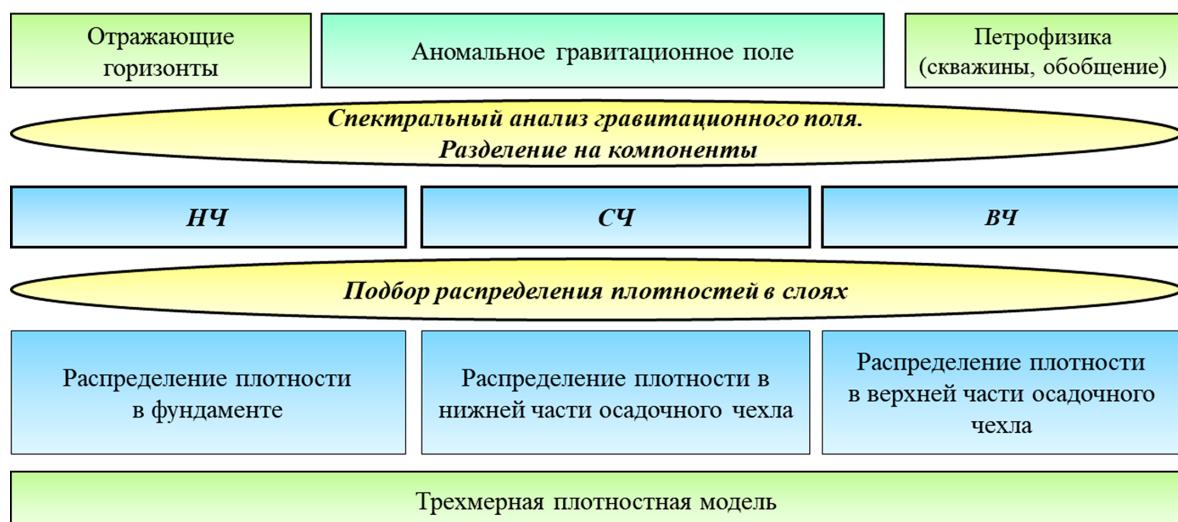


Рис. 4. Блок-схема построения плотностной модели осадочного бассейна в зоне активного рифтинга (на схеме выделены отличительные особенности процесса)

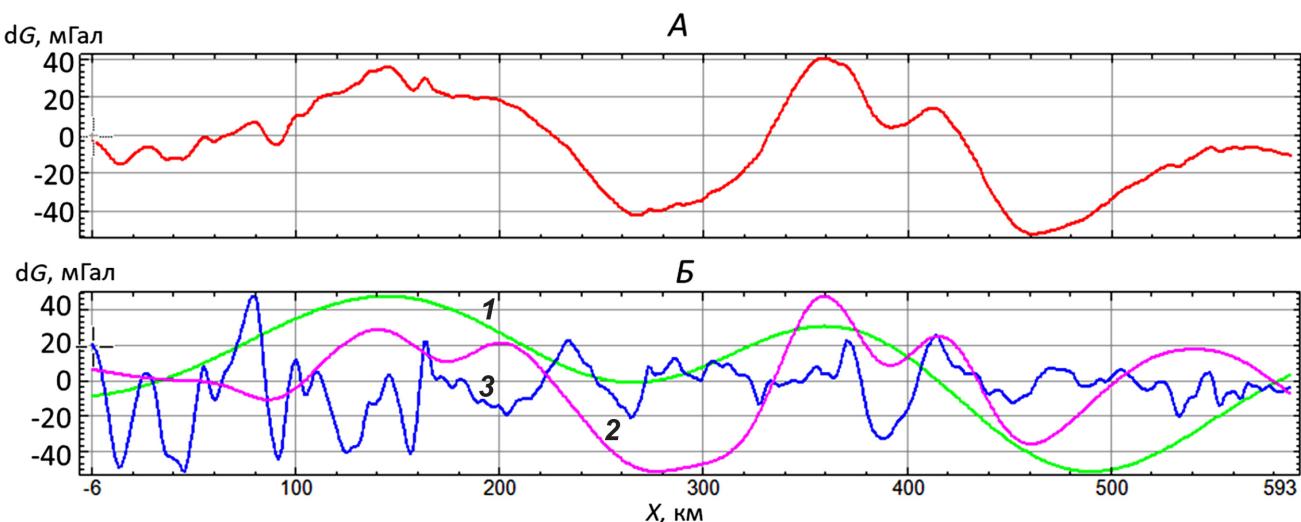


Рис. 5. Разделение гравитационных НЧ (1), СЧ (2) и ВЧ (3) эффектов до подбора (пример 1): *А* — исходное гравитационное поле, *Б* — покомпонентный анализ

Основные структурные комплексы	Глубина залегания, км	Плотностная дифференциация, г/см ³	Схематичное изображение
1. Терригенно-осадочный (юра и моложе), горизонтально-слоистый	1,5–3	низкая (1,9–2,1)	
2. Терригенно-карбонатный (средний девон–триас), сложнодислоцированный, насыщен разломами и сбросо-надвиговыми структурами	≤4	высокая (2,67–2,73)	
3. Палеозойский (ордовик–средний девон) осадочный, частично дислоцированный	3–7	средняя, близка к минеральной (2,75–2,85)	
4. Архейско-нижнепротерозойский фундамент, разломно-блоковое строение	5–7	высокая (2,8–3,1)	

Рис. 6. Модель осадочного бассейна в складчато-надвиговой зоне

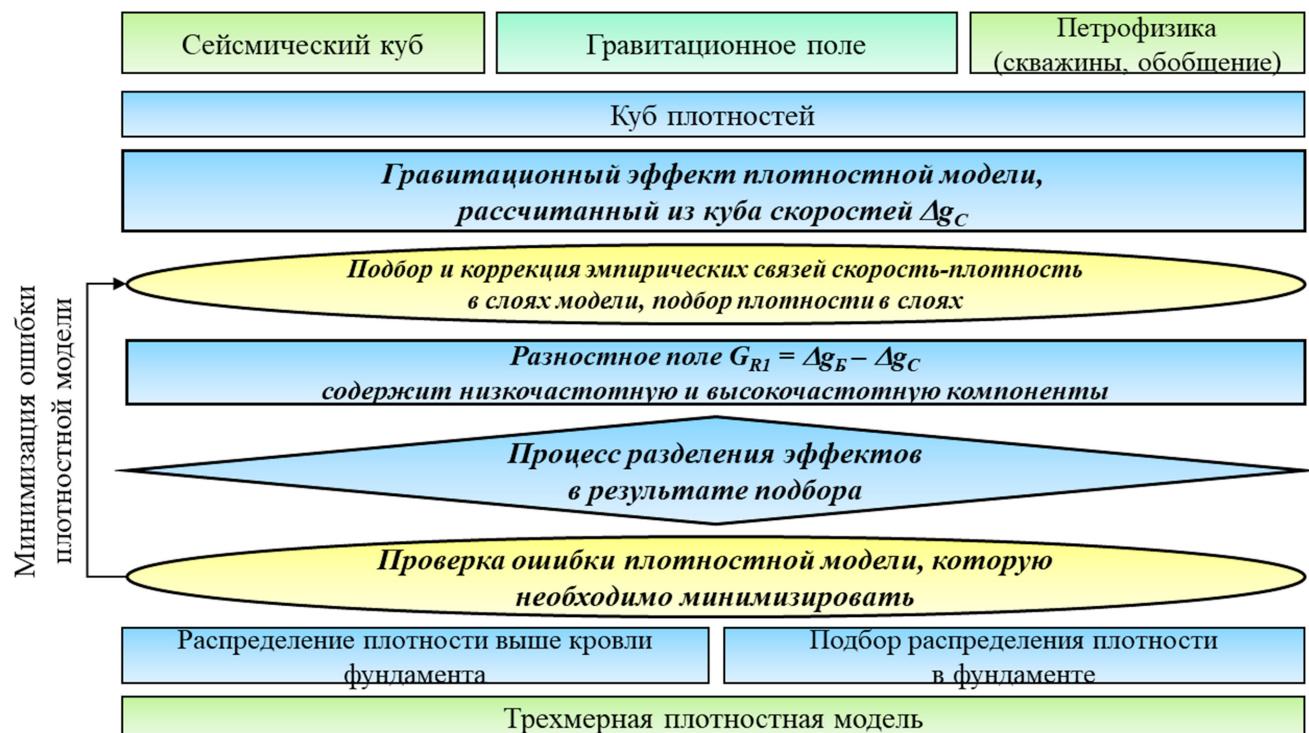


Рис. 7. Блок-схема построения трехмерной плотностной модели в складчато-надвиговой зоне. На схеме курсивом выделены отличительные особенности процесса в рассматриваемом примере

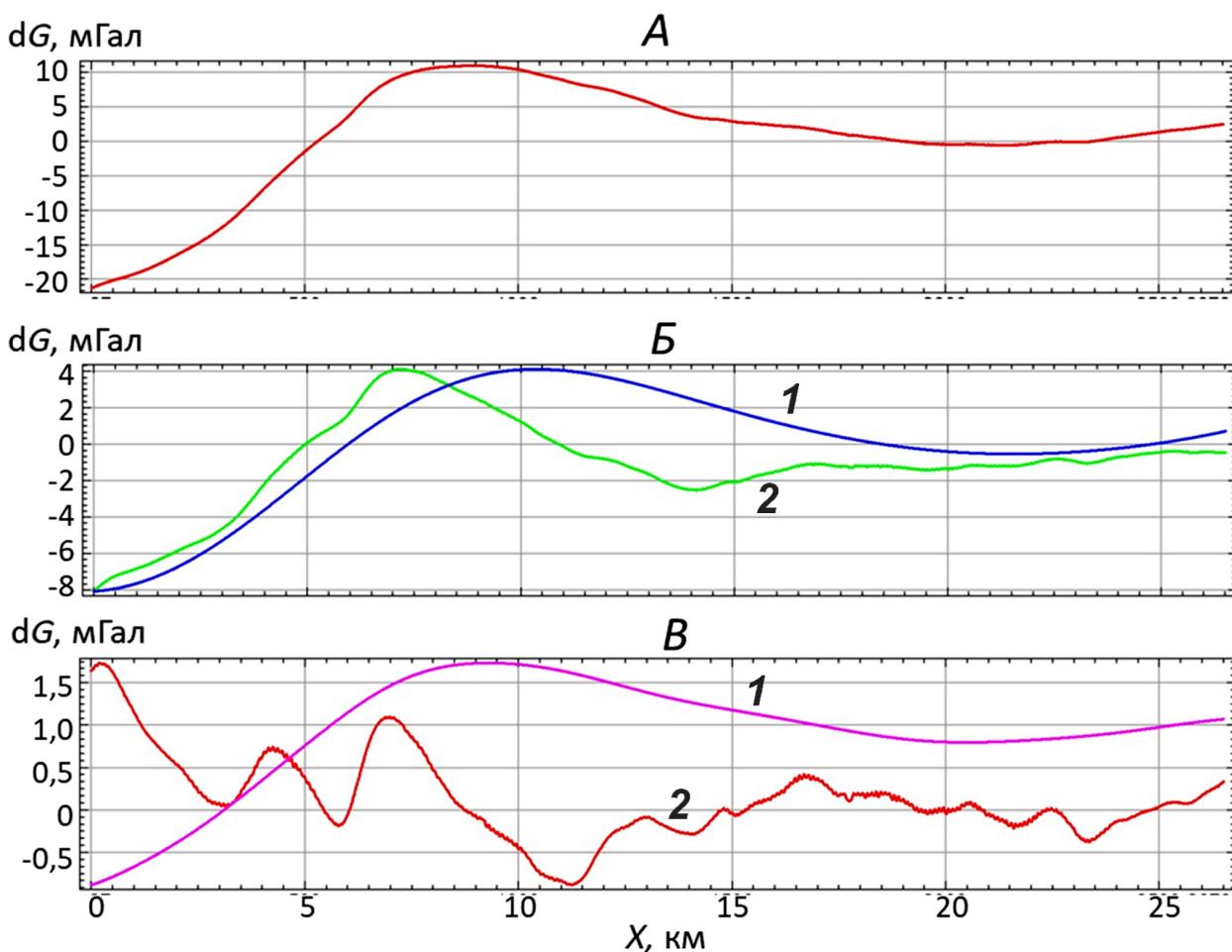
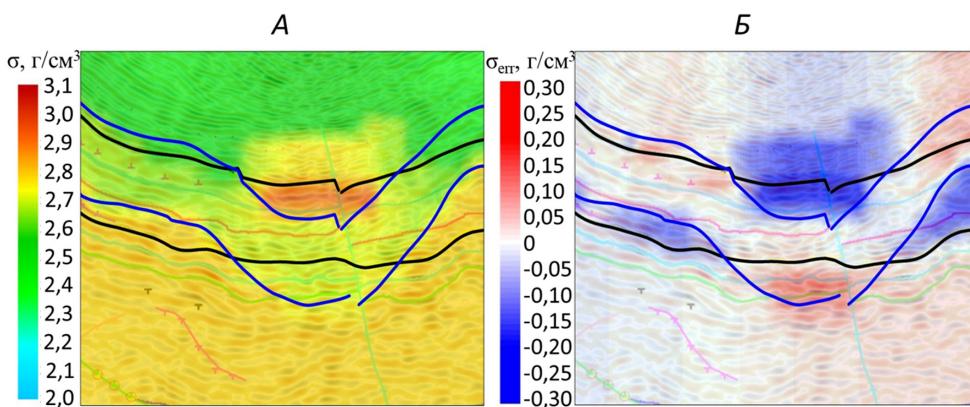


Рис. 8. Разделение гравитационных НЧ (1) и СЧ (2) эффектов до и после подбора (пример 2): А — исходное гравитационное поле, Б — покомпонентный анализ до подбора, В — покомпонентный анализ после подбора

Рис. 9. Иллюстрация результатов сейсмогравитационного моделирования: *А* — фрагмент сейсмоплотностного разреза, *Б* — величина изменения плотности в ходе подбора. Положение сейсмических отражающих горизонтов до (черное) и после (синее) сейсмогравитационного моделирования.



Исходное гравитационное поле (рис. 8, *А*) с помощью формального применения трансформаций не может быть однозначно разделено на среднечастотную и низкочастотную компоненты. В СЧ-компоненте (рис. 8, *Б*) присутствует влияние нижележащих слоев и только в процессе подбора с минимизацией невязки гравитационные эффекты разделяются на СЧ- и НЧ-компоненты (рис. 8, *В*). Предполагается, что выделенная таким образом НЧ-компоненты соответствует гравитационному эффекту фундамента, а СЧ-компоненты — осадочного чехла.

По полученным частотным компонентам (НЧ и СЧ) подобраны избыточные значения плотности в фундаменте и трех стратиграфических толщах осадочного чехла, которые послойно суммировались с начальной моделью, полученной по результатам пересчета скорость—плотность. Итогом моделирования стала трехмерная сейсмоплотностная модель [Соколова и др., 2019].

Корректировка значений скорости. Важнейшим итогом комплексной интерпретации на рассматриваемой площади и отражением ее геологической эффективности стала заключительная стадия, в процессе которой итоговый плотностной куб переведен в скоростной, а по обновленному скорректированному скоростному кубу пересчитана морфология сейсмических отражающих горизонтов (рис. 9). Процесс корректировки плотностной модели, скоростной модели и впоследствии отражающих горизонтов сходящийся, итерационный, желательно многократный. На практике в связи с тем, что каждая итерация не просто достаточно трудоемка, но еще требует вовлечения в процесс специалистов трех интерпретационных групп — геологов, гравиметристов, сейсморазведчиков — практически реализована только одна итерация, на основе которой построен итоговый сейсмический куб. Изменение значений скорости достигло 500 м/с, корректировка глубины — не более 400 м.

Сейсмогравитационное моделирование осадочного бассейна в зоне со сложнодислоцированным осадочно-терригенным разрезом с преобладанием вертикальных тектонических движений на примере Баренцева моря. Анализ априорных данных и выбор стартовой модели. Главные особенности

геологического строения определяются положением площади в пределах Северо-Баренцевского прогиба, представляющего собой северный фрагмент более крупной тектонической единицы — Восточно-Баренцевского мегапрогиба. Для структуры в целом характерно двухъярусное строение, при котором на сильнодислоцированном AR—PZ₁ фундаменте, подверженном в каледонский период интенсивным тектоническим деформациям, залегает мощный (до 5 км) чехол осадочных отложений девонско-юрского возраста [Афанасенков и др., 2017]. Чехол пронизан серией субвертикальных разломов и системами даек. В верхней части разреза по характерным особенностям волновых полей фиксируются разрозненные, но многочисленные межпластовые внедрения. Не исключено присутствие базальтовых потоков юрско-мелового возраста (рис. 10).

В этой ситуации создание сейсмоплотностной модели нулевого приближения потребовало максимального погружения в априорные данные, в первую очередь необходимы геологические характеристики, включая историю развития региона.

Источником информации для построения плотностной модели нулевого приближения стала априорная геологическая концепция, включающая сведения об истории геологического развития, данные плотностного и скоростного каротажа и данные сейсморазведки 2D (табл. 3).

Таблица 3

Методические параметры исходных данных (пример 3)

Число скважин			Обеспеченность геофизическими данными	
Общее	Каротаж	Примечания	Сейсморазведка	Гравиразведка
15	11	за пределами исследуемой площади	профили 2D, переинтерпретация, сеть неравномерная: между профилями — от 4 км в центре до 25–30 км и более на периферии	актуализированные цифровые модели, построенные с учетом съемок разного масштаба и точности, выполненных в 2008–2015 гг. в комплексе с 2D сейсморазведкой

Основные структурные комплексы	Глубина залегания, км	Плотностная дифференциация	Схематичное изображение
1. Верхний осадочно-терригенный	≤ 3	средняя	
2. Нижний (уплотненный) осадочно-терригенный	3,0–3,5	высокая	
3. Архейско-протерозойский фундамент, разломно-блоковое строение, присутствие интрузивных образований	14–15	высокая	

Рис. 10. Обобщенная модель осадочного бассейна в зоне господства вертикальных тектонических движений

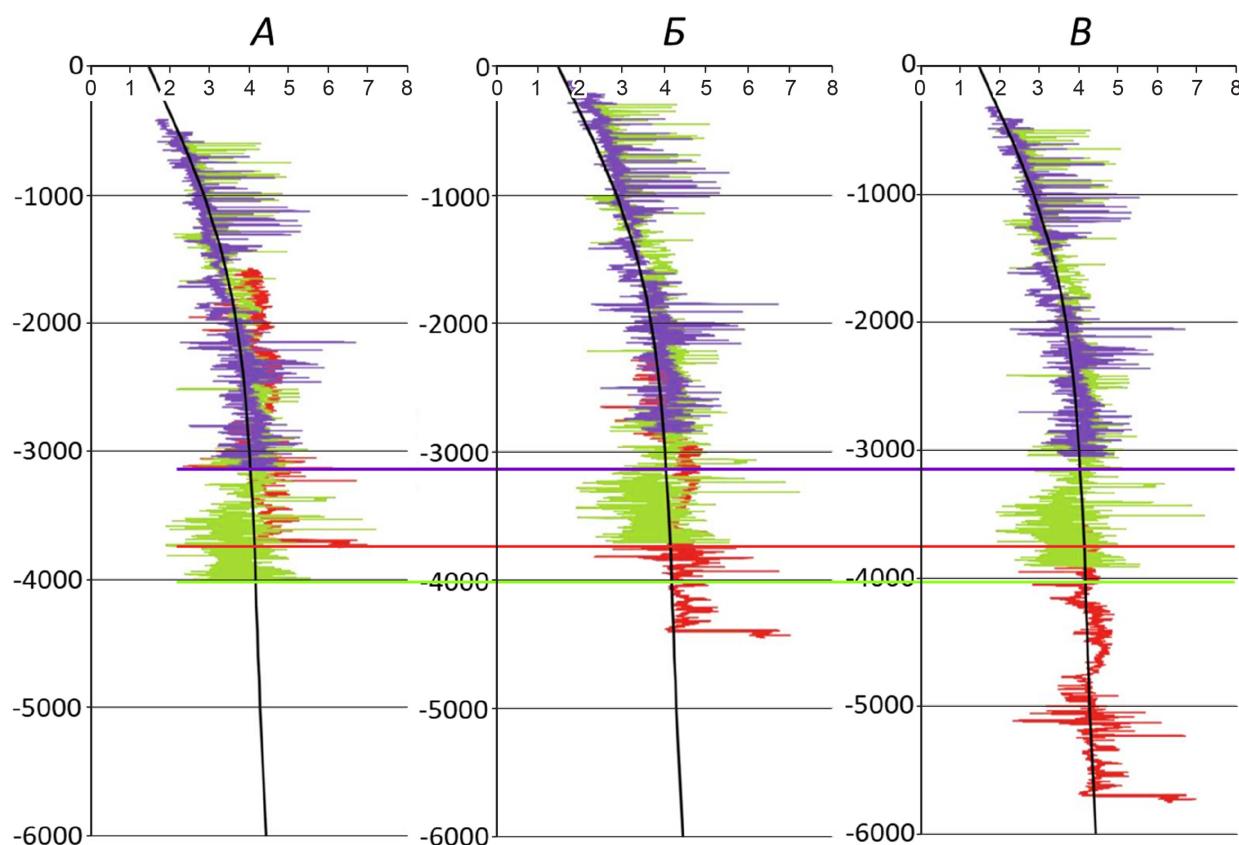


Рис. 11. Подбор закона распределения скорости с глубиной с учетом амплитуды вертикальных тектонических движений: *А* — относительно современного положения стратифицированных толщ на глубине; с учетом амплитуды вертикальных тектонических движений: *Б* — по актуальным геологическим представлениям о ходе исторического развития территории; *В* — прогноз значений амплитуды по геофизическим данным

На рассматриваемой площади скважин нет, поэтому для физико-геологической характеристики разрезов использованы данные бурения и каротажа скважин, расположенных поблизости. Литологические свойства разреза таковы, что в некоторых местах отклонение от подобранной зависимости связи скорость–плотность велико, следовательно, изучение плотностных и скоростных данных по каротажу и моделирование потребовали специального подхода.

Существенное преобладание в разрезе глинистых пород и значительная мощность триасовых отложений на изучаемой территории (около 10 км) оправдывают использование для всего разреза обобщенной (теоретической) зависимости изменения плотности с глубиной для глин.

На рис. 11 представлен подбор закона распределения скорости с глубиной по трем скважинам (фиолетовый, зеленый, красный) и по сейсмическому



Рис. 12. Блок-схема построения плотностной модели осадочного бассейна в зоне активных тектонических движений. На схеме курсивом выделены отличительные особенности процесса в рассматриваемом примере

кубу (черная линия). Для современных значений глубины (рис. 11, А) линия «красной» скважины лежит заметно в стороне как от остальных двух скважин, так и от сейсмических скоростных представлений. Однако если учесть поправку за величину вертикальных палеотектонических перемещений (рис. 11, Б), то совпадение больше и для значений плотности по скважинным данным, и для исходного и рассчитанного гравитационных полей. Еще меньше была бы невязка гравитационного эффекта стартовой модели для случая, показанного на рис. 11, В (прогноз значений амплитуд палеотектонических смещений по плотностному каротажу и гравитационному полю), однако во втором случае предполагаемые амплитуды подвижек и современная геологическая концепция принципиально расходятся.

По результатам интерпретации материалов сейсморазведки мощность осадочного чехла (глубина фундамента) в пределах изученного участка достигает 12 км. Выше было отмечено, что информация по скважинам в лучшем случае позволяет охарактеризовать породы до глубины около 3–4 км. Для изучения характера изменения плотности на глубине в интервале 4–12 км и более использованы результаты 2D плотностного моделирования по сети опорных профилей.

Построение трехмерной плотностной модели. Общая схема построения трехмерной сейсмоплотностной модели в зоне вертикальных тектонических движений представлена на рис. 12.

Стартовая модель — куб расчетных значений плотности — построен на основе связей плотность—

глубина (а не скорость—плотность, как в предыдущем примере), закономерности заданы для трех стратиграфических интервалов.

Остаточное поле, полученное после вычитания из исходного поля гравитационного эффекта стартовой модели, разделено на три компоненты (рис. 13): низкочастотную (фильтр низких частот, 60 км), среднечастотную (полосовой фильтр Баттервортса, 20–60 км) и высокочастотную (фильтр высоких частот, 20 км).

В процессе моделирования остаточные эффекты от нижележащих слоев «помещали» в вышележащие, таким образом осуществлена коррекция среднечастотной и высокочастотной компонент.

Остаточное поле после подбора распределения значений плотности в трех слоях соотнесено с эффектами в слое от морского дна до кровли меловых отложений. Итогом сейсмогравитационного моделирования стал 3D плотностной куб [Широкова и др., 2020].

Результаты исследований и их обсуждение. Проанализированы три примера сейсмогравитационного моделирования в разных физико-геологических ситуациях: в зоне активного рифта, в складчато-надвиговой зоне и в зоне, подверженной вертикальным тектоническим движениям.

В первом рассмотренном случае аномальное гравитационное поле однозначно разделяется на три компоненты, которые в полном согласии с исходной геологической концепцией соответствуют распределению избыточных значений плотности в пределах трех основных структурных комплексов.

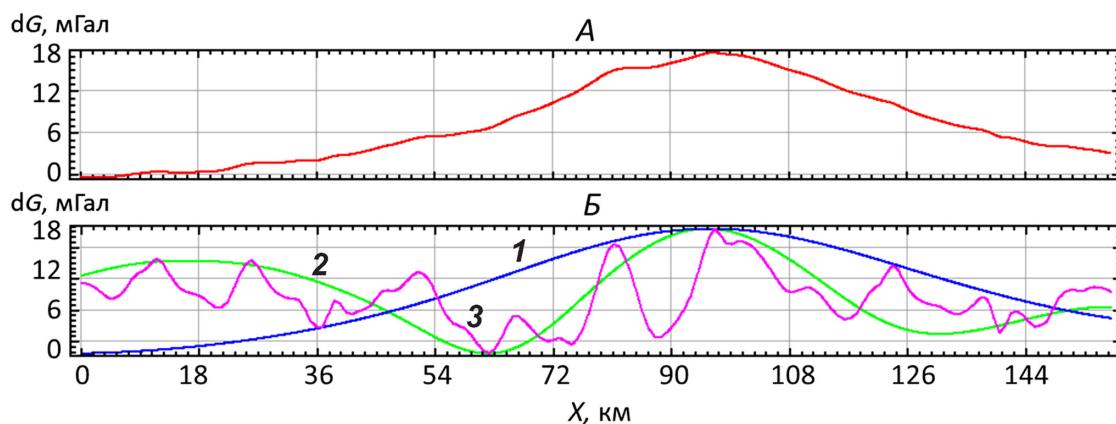


Рис. 13. Разделение гравитационных НЧ (1), СЧ (2) и ВЧ (3) эффектов до подбора (пример 3): *А* — исходное гравитационное поле, *Б* — покомпонентный анализ

Сейсмоплотностная модель нулевого приближения построена с учетом скважинных данных и двумерного гравитационного моделирования и представляет собой слоистые разрезы с постоянными значениями плотности в слоях.

Во втором практическом примере попытка формального покомпонентного разделения поля до начала процесса подбора при сейсмогравитационном моделировании оказалась неэффективной. Сейсмоплотностная модель нулевого приближения построена с учетом эмпирической зависимости скорость–плотность. Эта модель, по сути, отражает гравитационный эффект сейсмического скоростного куба, пересчитанного в плотностной по принятой зависимости. Остаточное поле отражает эффект структур, не выявленных в ходе сейсмической интерпретации и учтенных при заключительных итерациях подбора. Результативная плотностная модель была использована для создания новой скоростной модели, в которой учтены локальные неоднородности разреза, с последующей корректировкой глубины отражающих горизонтов.

В третьем примере, как и во втором, формальное разделение исходного гравитационного поля на компоненты неэффективно для сейсмогравитационного моделирования. Для создания модели нулевого приближения, согласованной с актуальной геологической концепцией, использованы законы изменения плотности с глубиной, установленные по данным ГИС с учетом теоретических закономерностей и значений амплитуды вертикальных палеотектонических движений. Кроме того, важнейшей особенностью сейсмогравитационного моделирования стало то, что критерий геологической достоверности плотностной модели обладает приоритетом по сравнению с формальной точностью подбора (СКП).

Приведенные выше примеры отличаются как по геологической ситуации, так и по набору исходных данных, и в каждом случае была применена особая методика сейсмогравитационного моделирования.

Заключение. Практический опыт сейсмогравитационного моделирования в разных ситуациях

наглядно свидетельствует о том, что методика построения сейсмоплотностной модели в каждом случае адаптируется к геолого-геофизической ситуации. Приведенные примеры иллюстрируют, что она меняется не только в зависимости от геологической ситуации (соотношение структурных комплексов, плотностная дифференциация горных пород, взаимоотношение скоростных и плотностных характеристик разреза, история геологического развития территории и т. д.), но и от объема и качества исходных данных (гравиразведки, сейсморазведки, петрофизических данных, геологической информации).

К важным факторам, способствующим дальнейшему повышению эффективности сейсмогравитационного моделирования, относятся усовершенствование аналитического аппарата; развитие вычислительной техники и программирования, в том числе использование технологии интерактивного экспериментного подбора с непрерывным изменением плотности в объеме [Чепиго и др., 2019; Чепиго, 2020], применение аналитических алгоритмов с использованием вейвлетов Пуассона для уточнения параметров разреза [Кузнецов, Булычев, 2017].

Дальнейшего анализа требуют условия, ограничивающие возможности и эффективность применения сейсмогравитационного моделирования, — территории, физико-геологические особенности которых делают неэффективным покомпонентный анализ, а также неоптимальные параметры геофизических съемок.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках проекта «Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики» (договоры № 5-15-2021, ЦИТИС № 121042200088-6).

Благодарности. Авторы статьи пользуются возможностью поблагодарить за плодотворное сотрудничество коллег геологов и сейсморазведчиков А.П. Афанасенкова, А.Н. Обухова, В.А. Никитину, Л.А. Клещину, О.М. Мятчину, А.С. Федечкину, К.С. Черникова, без активного, творческого участия

которых комплексная интерпретация геофизических данных не дала бы столь эффективных, геологически значимых решений.

Большую помощь и поддержку в процессе выполнения работ оказали сотрудники кафедры,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Бубнов Б.А. Об одной совмещенной постановке обратных задач сейсмики и гравиметрии // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, № 5. С. 1086–1090.
- Афанасенков А. П., Лыгин И.В., Обухов А.Н. и др. Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика. 2017. № 2. С. 60–70.
- Булах Е.Г., Ржаницын В.А., Маркова М.Н. Применение метода минимизации для решения задач структурной геологии по данным гравиразведки. Киев: Наукова думка, 1976.
- Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.А. и др. Комплексная трехмерная геолого-геофизическая модель коры на юго-востоке Фенноскандинавского щита: природа плотностной расслоенности коры и коромантийной границы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. № 6 (2). С. 133–170.
- Голиздра Г.Я. Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры. М.: Недра, 1988.
- Даудина Д.В., Полудеткина Е.Н., Тихоцкий С.А. Комплексная инверсия геофизических и геохимических данных при изучении УВ систем на акваториях // Электр. сб. тез. конф. «II Балтийская школа-семинар Петрофизическое моделирование осадочных пород», Петергоф. URL: <http://petromodel.ru/petromodel/>. 2014.
- Корбунов А.И. К теории комплексной интерпретации // Геофизический журнал. 1980. Т. 2, № 3. С. 50–56.
- Кривошея К.В., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Широкова Т.П. Возможности современной гравиразведки и магниторазведки // Деловой журнал «Neftegaz.RU». 2019. № 1. С. 66–72.
- Кузнецов К.М., Булычев А.А. Анализ площадных потенциальных полей на основе вейвлетов Пуассона // Геофизика. 2017. № 6. С. 25–32.
- Ладовский И.В., Мартышко П.С., Дружинин В.С. и др. Методика и результаты объемного сейсмоплотностного моделирования глубинного строения земной коры и верхней мантии на примере Среднеуральского сегмента // Уральский геофиз. вестн. 2013. № 2(22). С. 31–45.
- Лыгин И.В., Кузнецов К.М., Соколова Т.Б. Современный взгляд на строение Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам интерпретации потенциальных полей // Тектоника современных и древних океанов и их окраин: Мат-лы XLIX Тектонического совещания, посвященного 100-летию Ю.М. Пушаровского. Т. 1. М.: ГЕОС, 2017. С. 256–260.
- Мелихов В.Р., Лыгин И.В., Пийт В.Б. Строение земной коры в зоне сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты по комплексу геофизических данных // Геофизика. 2011. № 2. С. 70–79.
- Мельник Е.А., Суворов В.Д., Мишенькина З.Р. Петрофизическая интерпретация сейсмоплотностных данных (на примере Муйской впадины) // Технология сейсморазведки. 2016. № 4. С. 84–91.
- Романюк Т.В. Изучение соотношений между скоростью сейсмических волн и плотностью в литосфере методом сейсмо-гравитационного моделирования // Академик В.Н. Страхов. Геофизик и математик / Отв. ред. В.О. Михайлов. М.: Наука, 2012. С. 118–143.
- Соколова Т.Б., Лыгин И.В., Широкова Т.П., Золотая Л.А. Опыт сейсмогравитационного моделирования в разных физико-геологических ситуациях // Сб. тез. Междунар. геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2019». Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2019. С. 246–252.
- Старостенко В.И., Козленко В.Г., Русаков О.М. Гравитационная модель северной части Индийского океана // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, № 4. С. 840–843.
- Страхов В.Н., Романюк Т.В., Фролова Н.К. Методы решения прямых задач гравиметрии, используемые при моделировании глобальных и региональных гравитационных аномалий // Новые методы интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. М.: ИФЗ, 1989. С. 118–235.
- Чепиго Л.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615095 GravInv2D. М.: Роспатент, 2020.
- Чепиго Л.С., Лыгин И.В., Булычев А.А. Прямая двумерная задача гравиразведки от многоугольника с параболической плотностью // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2019. № 4. С. 89–93.
- Широкова Т.П., Лыгин И.В., Соколова Т.Б. Геологические факторы, определяющие ограничения эффективности сейсмогравитационного моделирования // Тр. III Междунар. геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2020». Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. Т. 1. Тверь; М.: ПолиПРЕСС, 2020. С. 153–155.
- Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density — The diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics. 1974. Vol. 39, N 6. P. 1603–1615.

поддерживающие и оперативно, по актуальным запросам совершенствующие математические аппараты моделирования А.А. Булычев, К.М. Кузнецов, Л.С. Чепиго.

Поступила в редакцию 20.05.2021

Поступила с доработки 30.06.2021

Принята к публикации 27.12.2021