

Пространственная информативность априорных геолого-геофизических данных и эффективность интегрального моделирования нефтегазоперспективных объектов

© Т. А. Федченко, А. П. Петровский, 2010

Ивано-Франковский Национальный технический университет нефти и газа,
Ивано-Франковск, Украина
Поступила 14 мая 2009 г.

Представлено членом регколлегии В. И. Старостенко

На прикладах Русько-Комарівського та Солотвинського газових родовищ Закарпатського прогину досліджено вплив просторової інформативності априорних геолого-геофізичних даних на кінцеву геологічну змістовність моделі середовища, яка отримана в результаті розв'язку оберненої задачі гравірозвідки. Результати аналізу підтвердили стійкість розв'язку обернених задач геофізики та комплексної інтерпретації геолого-геофізичних даних у критеріальній постановці.

The influence of spatial density of a priori geological and geophysical data on the geological adequacy of earth model obtained as a result of solving the inverse problem of gravity prospecting is being investigated using case histories of Russkie-Komarovzi and Solotvino gas fields of the Trans-Carpathian depression. The results of analysis made confirm stability of solving geophysical inversion in criteria setting.

Весь процесс проведения геофизических исследований — от полевых наблюдений до геологической интерпретации — нацелен на изучение особенностей глубинного строения геологических структур. В настоящее время создание цифровых пространственных детальных геолого-геофизических моделей — основной элемент адекватного описания геологической среды. При этом наиболее важным моментом является определение количественных параметров таких моделей, которое обеспечивается в результате решения соответствующих обратных задач для геофизических методов, задействованных в процессе решения геологической задачи.

Ранее [Федченко, 2009] были рассмотрены принципы создания пространственных моделей начального приближения и влияние на качество таких моделей пространственной информативности имеющейся априорной геолого-геофизической информации. Однако созданная модель начального приближения — это только первый этап создания геологически содержательной пространственной геолого-геофизической модели. В связи с этим важно изучение влияния пространственной ин-

формативности априорных геолого-геофизических данных, выраженных в виде модели начального приближения, на окончательную геологическую эффективность результатов пространственного интегрального геолого-геофизического моделирования.

В соответствии с принципами интегрального геолого-геофизического моделирования [Петровский, 2004], построение пространственной физико-геологической модели происходит в два этапа:

- создание структурной физико-геологической модели;
- создание модели распределения физических свойств.

Согласно априорным геолого-геофизическим данным было предложено три основных способа создания модели начального приближения, основанных на использовании:

- пространственно-низкоинформативных — 1D и 2D данных;
- пространственно-информативных — 1D и 2D данных, дополненных единичными 3D построениями;
- пространственно-высокоинформативных — кондиционных 3D данных, дополненных 1D и 2D информацией.

Настоящая статья посвящена исследованию влияния пространственной информативности априорных геолого-геофизических данных на результат интегрального геолого-геофизического моделирования на примере изучения глубинного строения Русско-Комаровского газового месторождения и Солотвинской площади Закарпатского прогиба (рис. 1).



Рис. 1. Положение площадей исследований (на тектонической схеме Карпатского НППР, ЗУРГЭ).

Геологическое строение территории. В тектоническом отношении Закарпатский прогиб включает Мукачевскую (в северо-западной части прогиба) и Солотвинскую (в юго-восточной части прогиба) впадины, разделенные меридиональным отрезком Вирголат-Гутинской вулканической гряды.

В структурно-тектоническом отношении в пределах прогиба выделяют два этажа: неогеновый чехол (собственно прогиб) и донеогеновый гетерогенный фундамент, характеризующийся блоково-надвиговым строением.

В литолого-стратиграфическом отношении донеогеновая основа прогиба представлена отложениями:

- палеозоя — в виде терригенно-карбонатных, эффузивно-туфоженных и карбонатных толщ перми;
- мезозоя — в виде карбонатно-терригенных пород триаса, терригенно-карбонатно-эффузивных отложений юры и терригенно-карбонатных образований мела;
- кайнозоя — в виде палеогеновых карбонатно-терригенных отложений, залегающих с

угловым и стратиграфическим несогласием на более древних породах.

Неогеновые отложения залегают с угловым и стратиграфическим несогласием на отложениях палеозоя, мезозоя и палеоцена. Эти отложения представлены породами миоцена и плиоцена. Миоцен разделен на буркаловскую (верхний эгенбург), терешульскую (карпатий), новоселицкую, тереблянскую, солотвинскую, тересвинскую, басховскую свиты (бадена), доробратовскую, луковскую и алмашскую свиты (сармата). В панонском комплексе выделяют изовскую свиту, тогда как в понтийском — кошеловскую свиту. Завершаются неогеновые отложения ильницкой и чопской свитами плиоцена.

Неогеновый структурный этаж имеет мощность от 600 м в приподнятых до 3500 м в опущенных блоках впадины и может быть разделен на два комплекса над- и подсолевой. Литологический разрез неогенового чехла представлен терригенными, галогенными и эффузивными образованиями (рис. 2).

Нефтегазоносность. Закарпатская газоносная область входит в состав Карпатской нефтегазоносной провинции. Поисковые работы на нефть и газ в Закарпатском прогибе проводятся начиная с 1953 г. В целом Закарпатский прогиб характеризуется значительным числом нефтегазопроявлений, однако на сегодняшний день здесь открыто только четыре газовых месторождения: Солотвинское, Русско-Комаровское, Королевское и Становское.

В пределах донеогенового структурного этажа к числу нефтегазоперспективных относятся триасовые, меловые, палеогеновые и, в меньшей степени, юрские отложения. В неогеновом структурном этаже различают карпатский газоперспективный и нижнебаденский, средне-верхнебаденский, сарматский и панонский газоносные комплексы.

Русско-Комаровское газовое месторождение и прилегающие территории. Русско-Комаровское газовое месторождение по кровле продуктивного горизонта доробратовской свиты контролируется брахиантиклинальной складкой [Русько-Комарівське..., 1998]. В пределах месторождения в отложениях сармата и верхнего бадения выявлено семь продуктивных горизонтов. Ниже продуктивных отложений находится интрузивное тело гранодиорит-порфирирового состава.

Создание пространственной интегральной геолого-геофизической модели обосновыва-

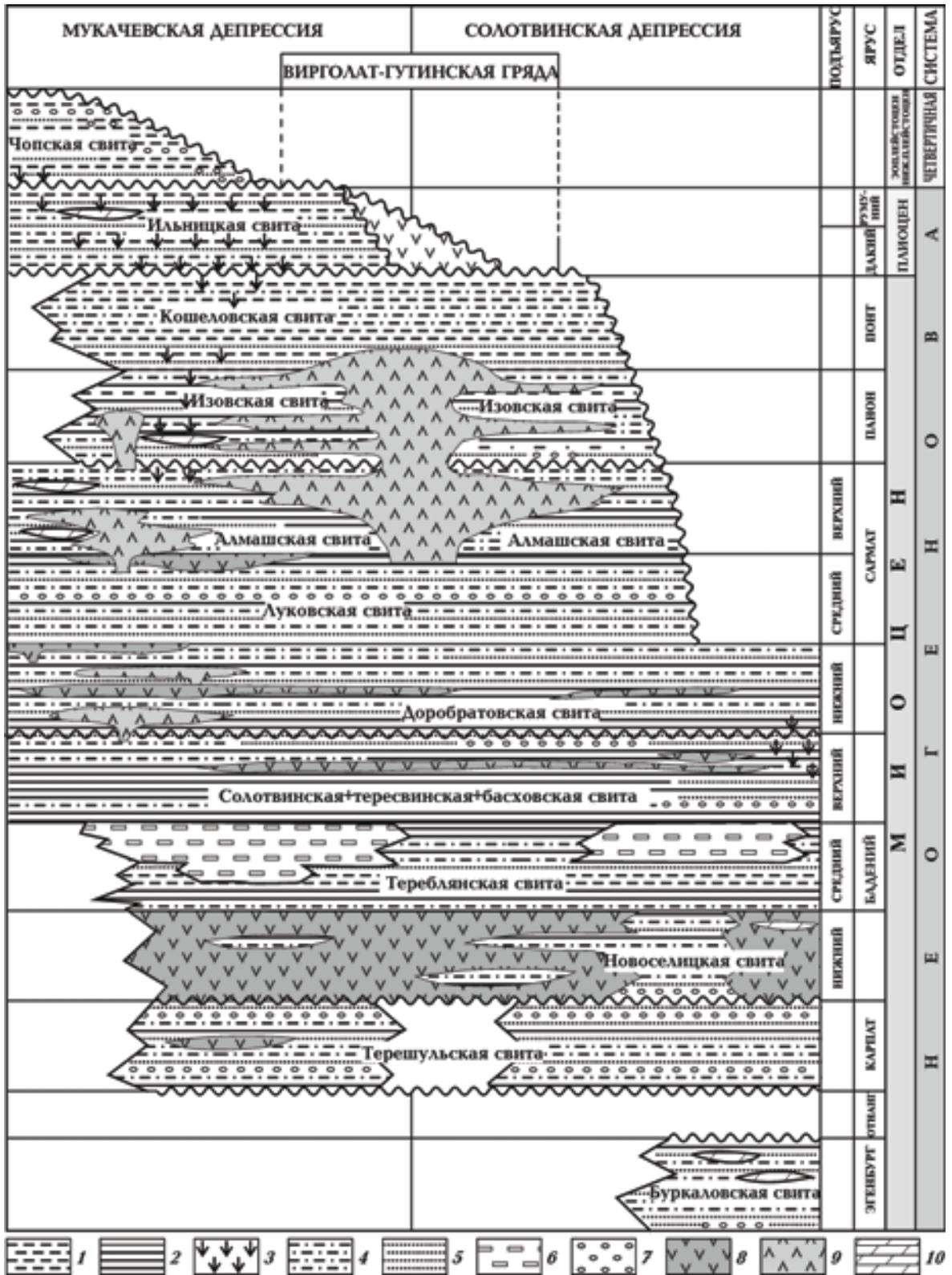


Рис.2. Сводный стратиграфический разрез Закарпатского прогиба (по М.Г.Приходько): 1 — глины; 2 — аргиллиты; 3 — лигниты; 4 — алевролиты (алевриты); 5 — песчаники (пески); 6 — соль каменная; 7 — конгломераты, гравелиты, брекчии осадочные; 8 — риолиты, риодациты, их пирокластика; 9 — андезиты, андезитодациты, андезитобазальты, их пирокластика и эпикластика; 10 — мергели.

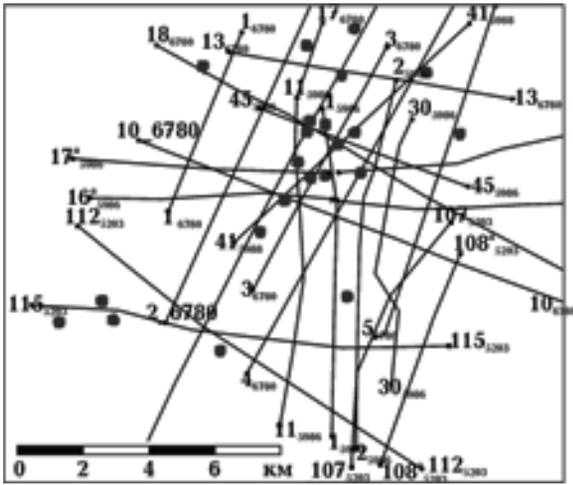


Рис.3. Схема размещения профилей и скважин на площади Русско-Комаровского газового месторождения.

лось необходимостью изучения отложений, залегающих глубже интрузивного тела, которые по предварительным результатам бурения могут быть отнесены к газоперспективным.

Исходными геолого-геофизическими данными для построения модели начального приближения Русско-Комаровского газового месторождения явились:

- структурные построения по отражающим горизонтам в кровле доробратовской $N_{1s}dг$ и терешульской N_{1kts} свит (отражающий горизонт А),
- сейсмогеологические построения по сети профилей (рис. 3),
- петрофизическая информация о породах, слагающих разрез.

Учитывая, что процесс изучения территории Русско-Комаровского газового месторождения проходил в два этапа, была возможность не только оценить качество созданных моделей начального приближения в зависимости от пространственной информативности геолого-геофизических данных, но и выполнить полный цикл интегральной интерпретации для каждой из моделей, созданных как на основе пространственно низкоинформативных данных, так и пространственно информативных.

В принципиальном плане создание модели с использованием пространственно информативных данных отличалось от создания модели с использованием пространственно низкоинформативных отсутствием площадных структурных построений.

Анализ созданных моделей начального приближения (рис. 4) показал их региональное подобие и отсутствие принципиальных противоречий как в особенностях пространственного поведения геоплотностных свойств, так и характера распределения и величин среднеквадратического отклонения создаваемых ими гравитационных полей:

- 3,95 мГал — для априорной модели, построенной по пространственно низкоинформативным данным;
- 3,31 мГал — для априорной модели, построенной по пространственно информативным данным.

Наряду с этим в варианте априорной модели, построенной с использованием пространственно информативного комплекса данных, наблюдается более детальное вертикальное и горизонтальное отображение известных особенностей геологического строения площади (см. рис. 4).

Следующим этапом создания интегральной геолого-геофизической модели являлось согласование геоплотностных параметров априорных моделей с наблюдаемым гравитационным полем, которое осуществлялось на основе решения обратной линейной задачи гравиразведки [Кобрунов, Петровский, 1990]:

$$\begin{cases} A\sigma(x, y, z) = \iiint_V \frac{\sigma(x, y, z)(z - z_0) dx dy dz}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} = \\ = \frac{u_z(x_0, y_0, z_0)}{\gamma}, \\ \sup_{(x, y, z) \in V} |F(\sigma(x, y, z)) - \sigma_0(x, y, z)| \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$$

где A — линейный интегральный оператор, действующий из линейного нормированного пространства моделей $\sigma(x, y, z) \in L_2(V)$ в линейное нормированное пространство геофизических полей $u_z(x_0, y_0, z_0) \in L_2(S)$ — измеренное гравитационное поле, заданное на плоскости $S(x_0, y_0, z_0 = \text{const})$, например $z_0 = 0$; (x_0, y_0, z_0) — координаты точек наблюдения; $\sigma(x, y, z) \in L_2(V)$ — искомая неоднородная плотность, заданная в полосе

XYZ пространства XYZ , где ось OZ направлена вниз, а $z = z_K$ и $z = z_{\Pi}$ — плоскости, ограничивающие область задания функции $\sigma(x, y, z)$ соответственно сверху и снизу; $z_K < z_{\Pi}$; γ — гравитационная постоянная, $\sigma_0(x, y, z)$ —

априорная модель начального приближения, $F : L_2(V) \rightarrow L_2(V)$ — линейный замкнутый оператор, действующий в $L_2(V)$ [Ефремов и др., 1980], имеющий ограниченный обратный.

Указанный процесс решения обратной линейной задачи гравиразведки (1) был выполнен как для варианта априорной модели, построенной по пространственно низкоинформативным данным $\sigma_0^N(x, y, z)$, так и для априорной модели, построенной по пространственно информативным данным $\sigma_0^I(x, y, z)$. В обоих случаях были получены неоднородные пространственные модели распределения плотности $\sigma^N(x, y, z)$ и $\sigma^I(x, y, z)$, которые с наперед заданной точностью ε удовлетворяли измеренному гравитационному полю:

$$\|A\sigma^N(x, y, z)\|_{L_2(V)} \leq \varepsilon \quad \text{и} \quad \|A\sigma^I(x, y, z)\|_{L_2(V)} \leq \varepsilon.$$

Соответственно для полученных моделей $\sigma^N(x, y, z)$ и $\sigma^I(x, y, z)$ среднеквадратическое отклонение между измеренным и рассчитанным гравитационными полями составило $\varepsilon^N = 0,3148$ мГал и $\varepsilon^I = 0,3045$ мГал.

Как и следовало из теоретических предположений, геоплотностная модель, полученная с использованием пространственно информативных данных, оказалась пространственно более разрешенной и контрастной, чем модель, полученная с использованием низкоинформативных данных. Проиллюстрируем этот результат сопоставлением сечений полученных моделей $\sigma^N(x, y, z)$ и $\sigma^I(x, y, z)$ по линии синтетического профиля, проходящего между линиями сейсмогеологических профилей, которые были использованы при построении априорных моделей. Выбор такого направления обусловлен тем, что именно в межпрофильном пространстве наиболее контрастно отображаются особенности как начальной модели, связанные со способом ее построения [Федченко, 2009], так и модели, полученной в результате решения обратной линейной задачи гравиметрии (рис. 5).

Сопоставление показывает, что различия в способах построения моделей начального приближения и, как следствие, порождаемые этим дополнительные ограничения в процедурах решения обратных задач привели к

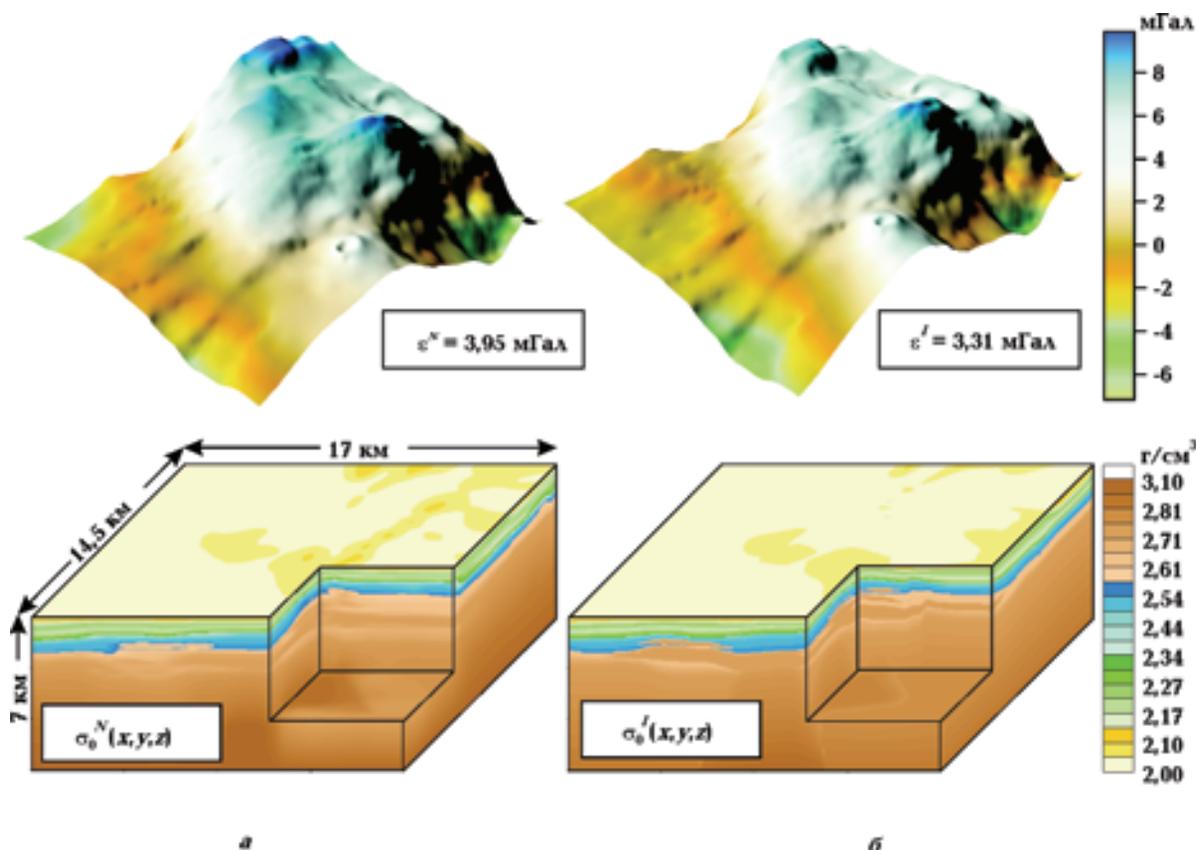


Рис. 4. Априорная геоплотностная модель, построенная с использованием: пространственно низкоинформативных (а) и пространственно информативных (б) данных и рассчитанное гравитационное поле.

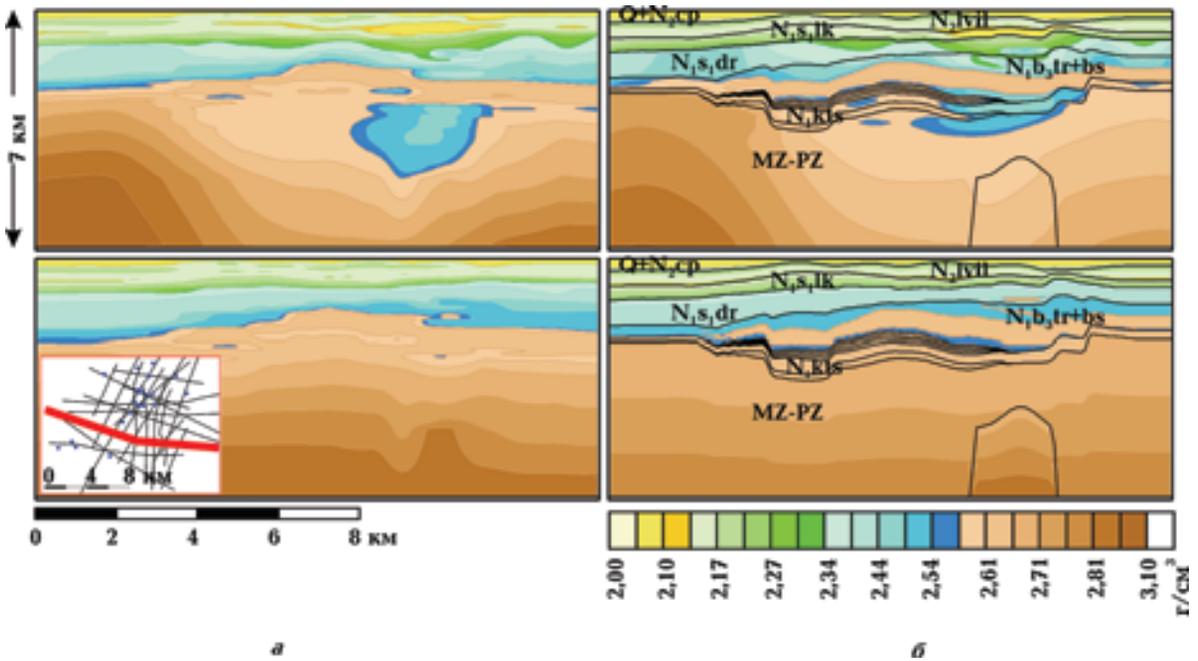


Рис.5. Разрез по линии синтетического профиля. Априорная геоплотностная модель (внизу) и результат решения обратной линейной задачи гравirazведки (вверху) для модели на основе пространственно низкоинформативных (2D+1D) (а) и пространственно информативных (3D+2D+1D) (б) данных.

получению двух подобных моделей распределения плотностных свойств. Это указывает на устойчивость процедуры решения обратной задачи интегральной интерпретации гравиметрических данных. При этом модели существенно различаются в деталях.

Так, геологический анализ полученных пространственных геоплотностных моделей $\sigma^N(x, y, z)$ и $\sigma^I(x, y, z)$ показал более высокую конечную эффективность использования модели начального приближения на основании способа для пространственно информативных данных $\sigma^I(x, y, z)$, обусловленную более благоприятными условиями для последующего картирования перспективных зон пониженных плотностей как в плане, так и при их отнесении к конкретным стратиграфическим уровням. В случае отсутствия кондиционных структурных построений возникает необходимость проводить плановую привязку зон понижения плотности по горизонтальным срезам 3D модели, на которых фактически находят отражение разновозрастные отложения. В связи с этим наблюдаемые на таких срезах плотностные неоднородности могут быть обусловлены не только вариацией плотности в пределах перспективного пласта, но и, в значительной степени, проявлением структурного плана (рис. 6). Сопоставление горизонтальных

срезов геоплотностной модели $\sigma^N(x, y, z)$ на глубинах $z = -845$ и 995 м (рис. 7) с внутрипластовым поведением геоплотностных свойств в купольной части антиклинальной структуры (отложения доробратовской свиты) показало, что выделенная разуплотненная зона, контролирующая зону развития газонасыщенного коллектора (рис. 7, а, б), на горизонтальных сечениях представляет собой уплотненный неперспективный блок (рис. 7, в, г).

Таким образом, наличие дополнительных площадных структурных построений позволило не только создать более детальную модель начального приближения, но и получить более геологически содержательную окончательную модель. Кроме того, на основе этих данных удалось выполнить детальный погоризонтный анализ распределения геоплотностных свойств и спрогнозировать положение и направление развития участков улучшения коллекторских свойств, в том числе в межинтрузивном и подинтрузивном пространствах. Для наиболее перспективных участков была выполнена оценка прогнозных углеводородных ресурсов и подготовлены рекомендации для их последующего изучения глубоким бурением.

Отдельные перспективные объекты, расположенные в краевых частях площади ис-

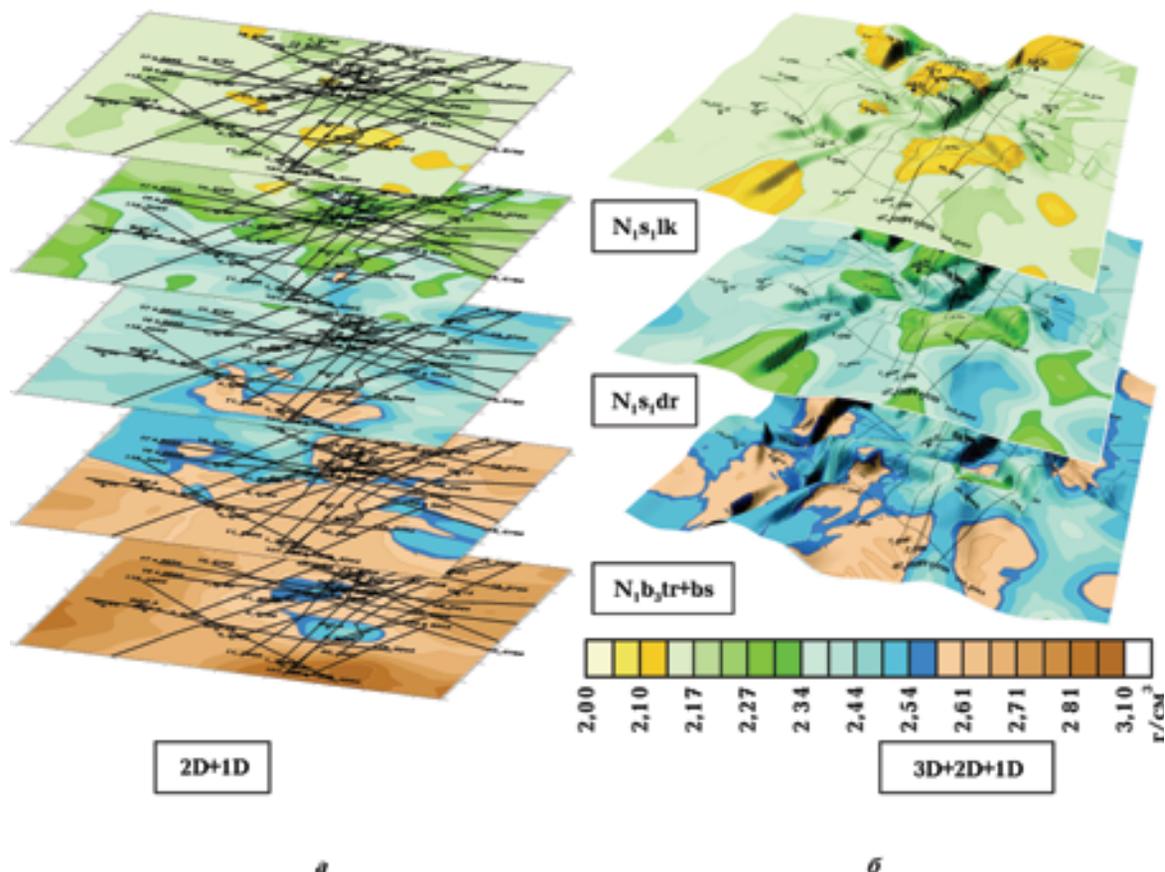


Рис.6. Пространственное поведение геоплотностных свойств в пределах 3D модели по горизонтальным сечениям (а) и внутрипластовым срезам (б).

следований, рекомендованы к доразведке на основе дополнительных тематических и полевых геолого-геофизических исследований.

Другим важным моментом, который необходимо учитывать при создании пространственных геолого-геофизических моделей, является учет положения и формы изометрических тел — магматических, глинистых и соленосных. В приведенном примере для Русско-Комаровского месторождения в разрезе присутствовали лакколитовое тело (в пределах собственно Русско-Комаровской структуры) и Велико-Добронский стратовулкан, нашедшие свое отображение как на сейсмогеологических профилях, так и в созданных пространственных структурной модели и модели распределения геоплотностных свойств.

Более сложной ситуацией является учет в разрезе соляного тела, например такого, которое было закартировано при создании пространственной интегральной геолого-геофизической модели Солотвинской площади Закарпатского прогиба при выполнении работ

по прогнозированию распространения коллекторов и перспектив нефтегазоносности в подсолевом терригенном комплексе.

Солотвинская площадь. В пределах Солотвинской площади в отложениях новоселицкой свиты неогена открыто Солотвинское газовое месторождение [Солотвинське ..., 1998]. Газовая залежь сводовая, массивная, тектонически экранированная, контролируется антиклинальной структурой. Кроме этого, в пределах площади по результатам глубокого бурения присутствуют многочисленные газопроявления из отложений палеогена, что является прямым признаком их перспективности и обуславливает необходимость соответствующей доразведки площади.

В южной части площади находится соляное тело. В связи с сейсмогеологическими и техногенными причинами при проведении профильных сейсмических работ геологическое строение как самого тела, так и подсолевых отложений осветить не удалось (рис. 8). Учитывая, что продуктивные скважины нахо-

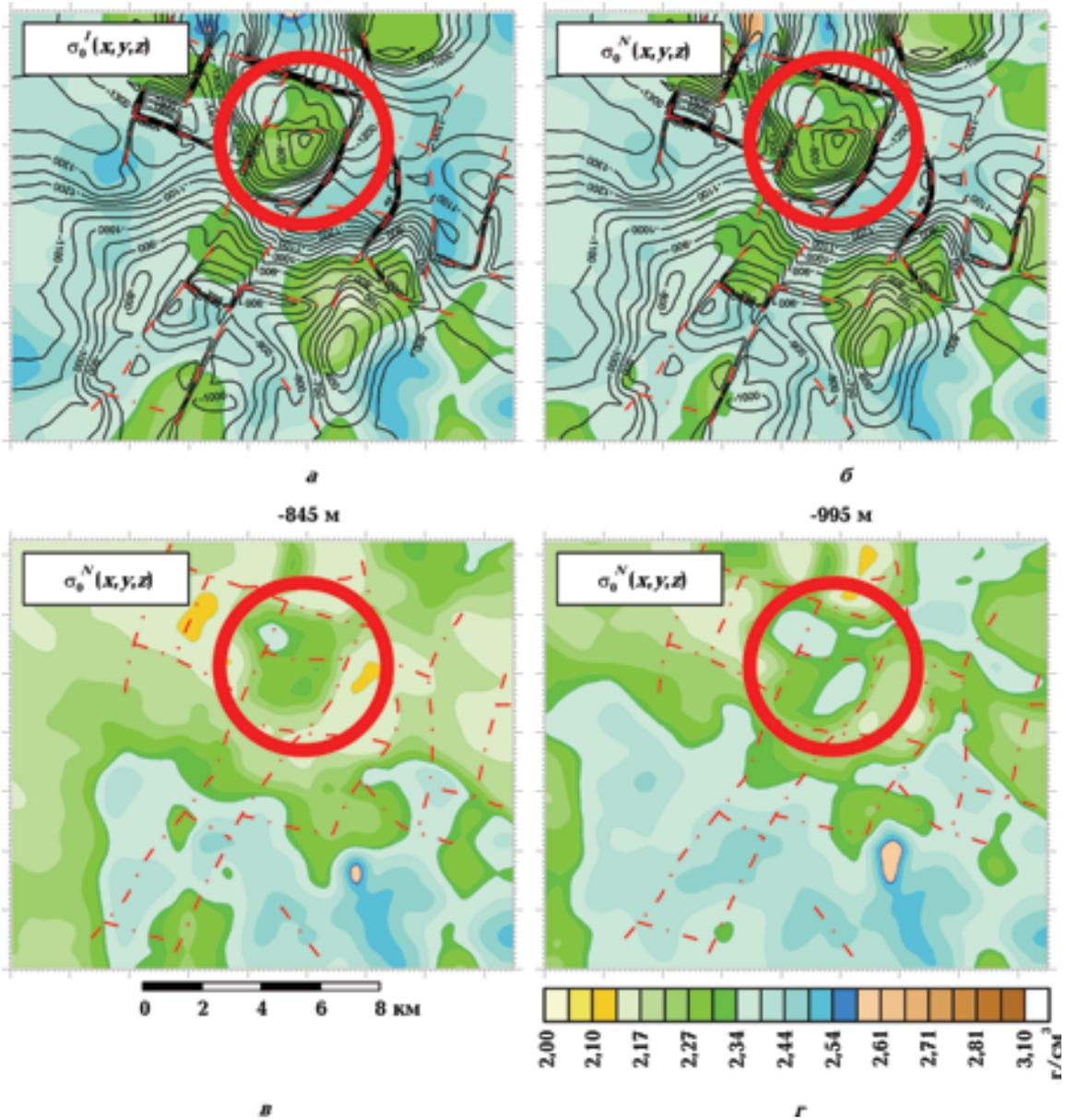


Рис. 7. Сопоставление распределения плотности в куполе структуры доробратовской свиты сармата $N_{1s,dr}$: а, б — внутрипластовые срезы моделей на основе пространственно информативных данных и пространственно низкоинформативных данных соответственно; в, г — горизонтальные срезы модели на основе пространственно низкоинформативных данных на уровнях -845 и -995 м.

дятся в непосредственной близости от соляного тела, а газопроявления получены из подсолевого комплекса, их качественное изучение невозможно без корректного учета характера поведения собственно соляного тела, в том числе и за счет пассивной [Петровский, 2005] интегральной интерпретации в комплексе с данными гравиразведки (рис. 9).

Положительный геологический результат решения этой задачи был получен на основе применения активной модели интегральной интерпретации комплекса сейсмогравитаци-

онных данных с учетом результатов геологокартировочного и глубокого бурения. Здесь на первом этапе было выполнено активное интегральное уточнение формы собственно соляного тела, а на втором — прогнозирование неоднородного распределения геоплотностных свойств как в надсолевом, так и подсолевом комплексах. Для последних затем было проведено прогнозирование участков развития пород с улучшенными коллекторскими свойствами, в том числе и газонасыщенных.

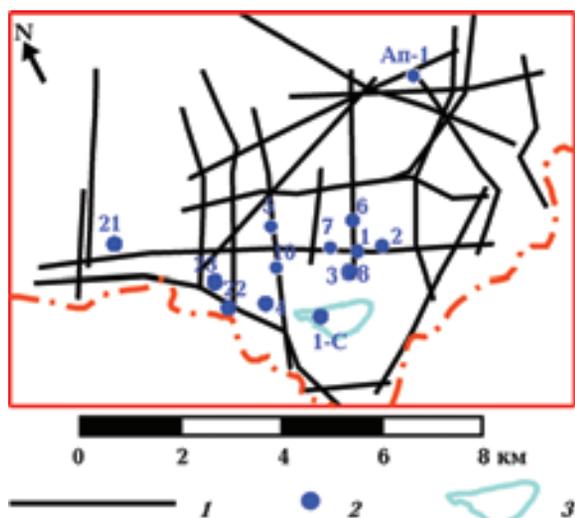


Рис. 8. Схема размещения линий сейсмических профилей и скважин в пределах Солотвинской площади: 1 — линии сейсмических профилей; 2 — скважины глубокого бурения; 3 — область выхода соляного тела на поверхность.

Так, в качестве начальной информации относительно поведения соляного пласта и Солотвинского соляного тела была привлечена концептуальная геологическая модель глубинного строения (см. рис. 9, б [Лозиняк, Малевич, 2005]) в виде геологического разреза, построенного по результатам бурения картировочных и поисковых скважин на соль. В дальнейшем форма соляного тела была скорректирована на основе решения обратной нелинейной — структурной — задачи гравirazведки (см. рис. 9, в). Корректность полученных структурных построений контролировалась результатами вскрытия кровли и подошвы соляного пласта глубокими скважинами 22, 4, 1 — Солотвино.

Результаты уточнения структурных особенностей строения соляного тела показали, что (рис. 10, 11):

- наиболее опущенный блок в подошве соли по своему положению не соответствует месту выхода соли на поверхность, а смещен от него в западном направлении на 1500 м. Глубина опущенного блока незначительно превышает два километра;

- в месте выхода штока на дневную поверхность в подсолевом комплексе отмечается приподнятый локализованный блок, вертикальный подъем которого, очевидно, обусловил перераспределение соляных масс, прорыв ими

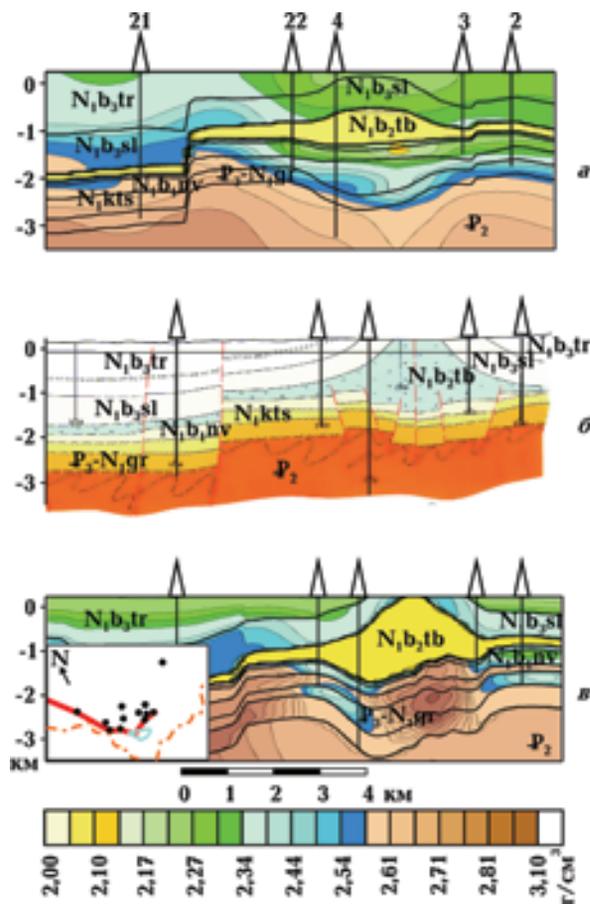


Рис. 9. Разрез пространственной геоплотностной модели Солотвинского газового месторождения по линии скважин 21, 22, 4, 3, 2: а — при использовании неправильной формы соляного тела; б — геологическая модель по [Лозиняк, Малевич, 2005]; в — полученный после уточнения формы соляного тела.

вышележащих пород и выход соли на дневную поверхность. Повышенная плотность выделенного блока указывает на его интрузивную природу, что подтверждается наличием раскрытых на площади поисковой скважины 1-Солотвино интрузивных жильных образований;

- характерной особенностью тектонического строения области развития соляного тела является наличие разнонаправленных разрывных нарушений как кольцевой формы, так и радиальных, идущих от центра соляного тела.

Последующее прогнозирование разуплотненных зон в пределах неогеновых и верхнепалеогеновых отложений выполнялось на основе решения обратной пространственной линейной задачи гравirazведки с максимальным учетом выявленных особенностей строения соляного тела.

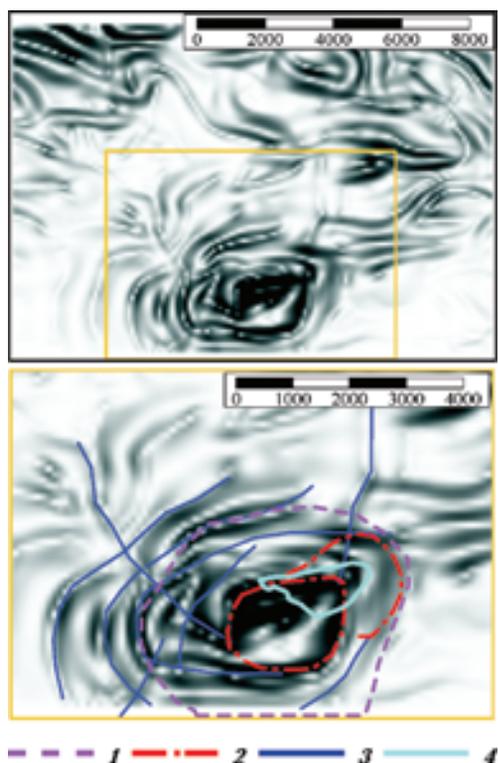


Рис. 10. Выделение приштоковых тектонических нарушений на основе анализа остаточной компоненты гравитационного поля: 1 — внешний контур соляного тела; 2 — внутренние контуры опущенного и приподнятого блоков в подошве соляного тела; 3 — тектонические нарушения; 4 — контур выхода соляного тела на дневную поверхность (Петрашкевич Н.И., Лозиняк П.Ю.).

Полученная окончательная пространственная интегральная сеймогравитационная модель позволила в пределах перспективных отложений новоселицкой свиты неогена N_1b_1nv и грушевской свиты верхнего палеогена P_3gr выделить зоны пониженной плотности (рис. 11), в пределах которых прогнозируется увеличение пористости и потенциальное газонасыщение пород.

В плановом отношении перспективные участки приурочены к отдельным блокам, разделенным как кольцевыми, так и радиальными по отношению к соляному телу тектоническими нарушениями, прослеженными по результатам сейсмических работ и линеamentного анализа остаточной невязки гравитационного поля. Наиболее перспективные блоки рекомендованы для дальнейшего изучения поисково-разведочным бурением.

Выводы. Выполненный вычислительный анализ влияния пространственной информа-

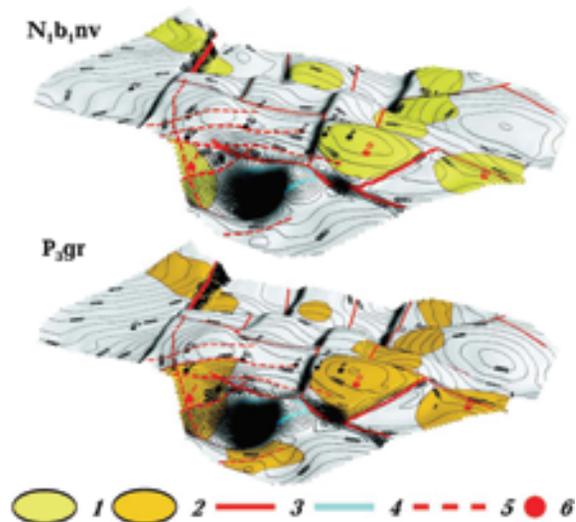


Рис. 11. Положение выделенных участков распространения отложений с улучшенными коллекторскими свойствами в пределах новоселицкой свиты неогена N_1b_1nv (сверху) и грушевской свиты палеогена P_3gr (снизу): 1, 2 — контуры участков; 3 — тектонические нарушения, выделенные по результатам 2D сейморазведки; 4 — контур выхода соляного тела на поверхность; 5 — тектонические нарушения, выделенные по результатам линеamentного анализа остаточного гравитационного поля; 6 — положение проектных скважин, рекомендуемых по результатам интегрального геолого-геофизического моделирования.

тивности априорных геолого-геофизических данных на геологическую эффективность пространственного интегрального геолого-геофизического моделирования на практических примерах подтвердил ранее теоретически доказанную единственность и устойчивость решения обратных задач геофизики и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных в критериальной постановке [Кобрунов, 1986; 2007; Кобрунов, Петровский, 1990; Петровский, 2005].

Практические примеры создания интегральных пространственных геолого-геофизических моделей сложнопостроенных геологических разрезов Русско-Комаровского и Солотвинского газовых месторождений показали, что для обеспечения геологической содержательности созданных интегральных моделей необходимо использовать наиболее достоверные и пространственно-информативные априорные геолого-геофизические данные.

Благодарности. Авторы выражают благодарность ДК «Укргаздобыча» за инициацию работ по изучению Солотвинского и Кон-

церну «Награ» — Русско-Комаровского газовых месторождений. Отдельная благодарность Боглаку П. М., Кудле П. И. (ЗУГРЭ, ГПП «Укргеофизика») и Лозыняку П. Ю. (Львовское отде-

ление УкрГГРИ) за любезно предоставленные геолого-геофизические данные и обсуждение вопросов глубинного строения Закарпатского прогиба.

Список литературы

- Ефремов А. В., Золотарев Ю. Г., Терпигорева В. М. Математический анализ (специальные разделы). Ч. II. Применение некоторых методов математического и функционального анализа: Учеб. пос. для вузов. — Москва: Высш. шк., 1980. — 295 с.
- Кобрунов А. И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных: Учеб. пос. — Ухта: Изд-во Ухтин. ун-та, 2007. — 287 с.
- Кобрунов А. И. Теоретические основы критериального подхода к анализу геофизических данных. — Киев, 1986. — 268 с. — Деп. в УкрНИИНТИ 03.06.86, № 1280-Ук 86.
- Кобрунов А. И., Петровский А. П. Итерационная схема решения обратной задачи гравиметрии // Докл. АН УССР. Сер. Б. — 1990. — № 2. — С. 13—16.
- Петровский А. П. Информационное обеспечение и модельные представления интегральной интерпретации геолого-геофизических данных при изучении нефтегазоносных структур // Геофиз. журн. — 2004. — 26, № 3. — С. 77—86.
- Петровский А. П. Математическая модель интегральной интерпретации комплекса геолого-геофизических данных // Геофиз. журн. — 2005. — 27, № 5. — С. 901—905.
- Русько-Комарівське родовище // Атлас родовищ нафти і газу України. — Львів, 1998. — Т. 4. — С. 689—693.
- Солотвинське родовище // Атлас родовищ нафти і газу України. — Львів, 1998. — Т. 4. — С. 701—705.
- Федченко Т. А. Принципы создания геолого-геофизически согласованных пространственных моделей начального приближения // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 3. — С. 77—86.