

УДК 550.830

ОБОЛОНСКАЯ АСТРОБЛЕМА – ИНТЕГРАЛЬНАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕТРАДИЦИОННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ КАК НОВЫЙ ОБЪЕКТ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ РАБОТ

А.П. Петровский, Ю.В. Анищенко, Т.А. Федченко, Н.С. Ганженко

Аннотация. Приведены результаты разработки и опробования оптимального комплекса детальных геофизических исследований для изучения как традиционных, так и нетрадиционных резервуаров нефти и газа с последующей комплексной интерпретацией на основе «Технологии интегральной интерпретации комплекса геолого-геофизических данных при поисках и разведке нефтяных и газовых месторождений». Создание пространственной интегральной геолого-геофизической модели Оболонской астроблемы позволило выделить и обосновать новые нефтегазоперспективные объекты в ее структуре и определить первоочередные для постановки глубокого бурения.

Ключевые слова. Астроблема, импактные структуры, 3D-интегральная модель, оптимальный комплекс.

Abstract. The paper illustrates implementation results of developed optimal set of geophysical studies for exploration conventional as well as unconventional oil & gas reserves based on «Technology of integral interpretation of a complex of geological-geophysical data for oil and gas fields exploration». Case study for Obolon impact structure illustrates technology of integral geological- & geophysical model construction used. 3D modelling resulted delineation of prospect areas for oil & gas within the structure and detected first priority targets for exploration drilling.

Key words. Astrobleme, impact structures, 3D integrated model, optimal complex.

ВВЕДЕНИЕ. Необходимость обеспечения промышленности и коммунальной сферы энергетическими, в том числе и углеводородными, ресурсами делает актуальной задачу их постоянного наращивания. На протяжении последних пяти лет в мире, и особенно в США, произошло перераспределение структуры углеводородных ресурсов с существенным увеличением доли углеводородов, добываемых из так называемых нетрадиционных коллекторов, к которым относятся сланцевые породы и плотные песчаники. Еще одним перспективным нетрадиционным источником углеводородов являются импактные структуры или астроблемы [1], которые образовались в результате столкновения Земли с космическими телами – метеоритами. Результаты геологического изучения подобных структур в различных частях Земли показали, что либо в их пределах, либо в непосредственной близости к ним расположены промышленные скопления различного минерального сырья, в частности углеводородов [11]. Учитывая, что для Украины характерны аналогичные проблемы, актуальной является задача поиска скоплений углеводородов в пределах имеющихся на ее территории импактных образований [4]. По мнению многих исследователей [2, 4], одним из наиболее перспективных в нефтегазовом отношении объектов следует считать Оболонскую астроблема, расположенную в непосредственной близости к южному краевому нарушению Днепровско-Донецкого авлакогена (ДДА) (рис. 1), в погруженной части которого установлены скопления углеводородов. Согласно данным мирового каталога импактных структур, Оболонская астроблема представляет собой кольцевую впадину диа-

метром около 18 км. Впервые Оболонская впадина была закартирована в рельефе поверхности фундамента в результате проведения региональных электроразведочных работ (1952 г.). Для ее изучения в разное время был выполнен значительный объем геолого-геофизических исследований, который включал профильные сейсмические наблюдения, гравимагнитометрические исследования, рекогносцировочные геохимические исследования, а также бурение в 1965–1966 г. в центральной части впадины трех поисково-картировочных скважин в рамках проекта поисков горючих сланцев.

Результаты бурения показали отсутствие горючих сланцев и признаков нефтегазоносности. Однако, учитывая значительные размеры впадины, а также теоретически прогнозируемые ресурсы углеводородов, в 2010–2011 гг. были проведены дополнительные детальные площадные комплексные геолого-геофизические исследования, которые включали сейсморазведочные работы 3D (1:25000), высокоточные гравиметрические и магнитометрические исследования (М 1:10000), а также региональные геохимические наблюдения М 1:200000 по регулярной прямоугольной сети пунктов геохимического опробования с шагом 1500 м.

Интерпретация полученного комплекса геолого-геофизических данных проводилась исходя из принятой концепции космического источника образования Оболонской впадины. Следуя этой концепции, в пределах территории Оболонской астроблемы выделены элементы, характерные для строения импактных структур (рис. 2) [6], такие как цокольный (породы мишени), коптогенный, заполняющий и перекрывающий комплексы.

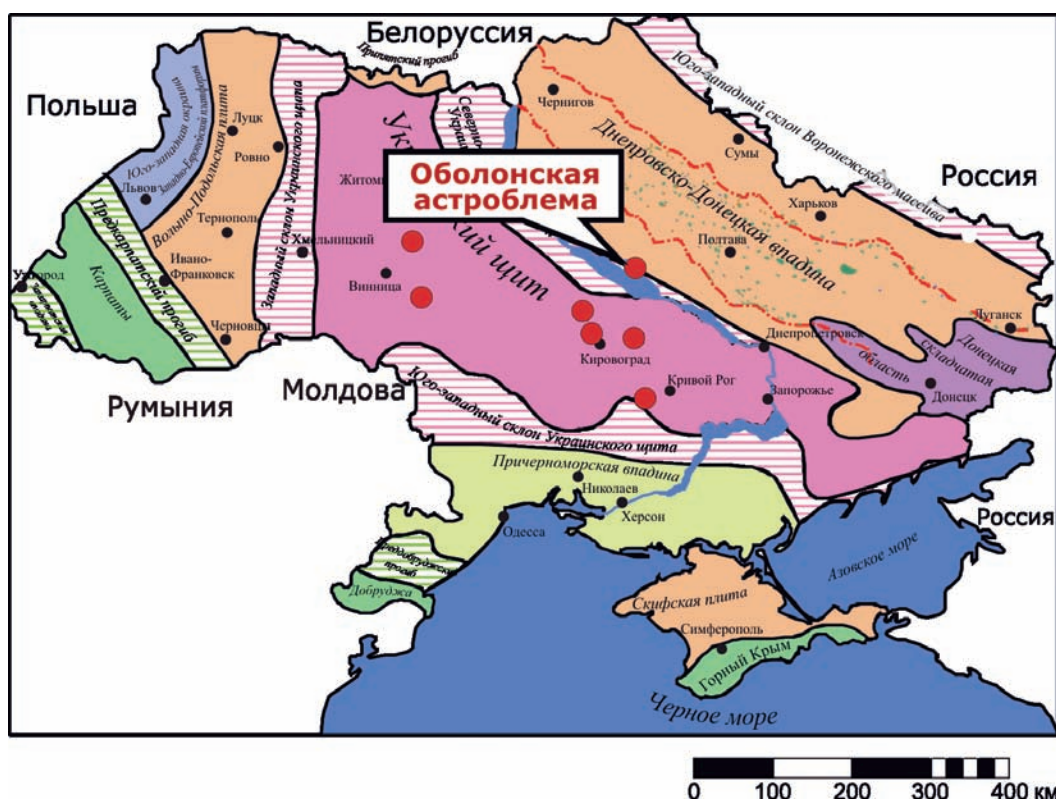


Рис. 1.
Положение импактных структур на тектонической схеме Украины

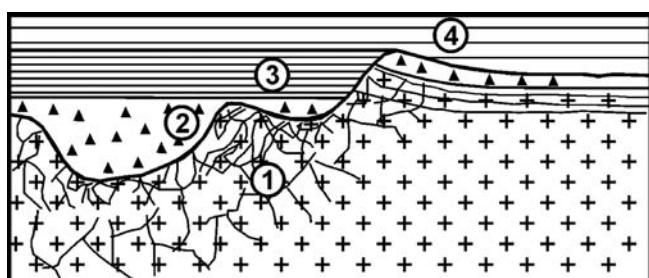


Рис. 2.
Литологические комплексы импактной структуры: цокольный (1); коптогенный (2); заполняющий (3); перекрывающий (4)

Исходные данные и метод исследований. Учитывая, что в пределах Оболонской астроблемы ожидалось развитие нетрадиционных ловушек углеводородов (УВ), для их прогнозирования необходимо было использовать новые подходы к анализу геолого-геофизических данных для изучения глубинного строения нефтегазоперспективных объектов. Одной из таких методик, получивших широкое распространение при поисках и разведке традиционных нефтегазоперспективных объектов, является «Технология интегральной интерпретации комплекса геолого-геофизических данных при поисках и разведке нефтяных и газовых месторождений» [8], которая обеспечивает создание пространственной интегральной физико-геологической модели объектов, согласованной со всем имеющимся комплексом геолого-геофизических данных. В данной технологии формирование результативной модели осуществляется последовательной реализацией следующих этапов: создание априорной модели территории исследования, включающей структурную основу

и модель непрерывного распределения физических свойств; уточнение параметров модели на основе решения обратной линейной задачи гравиметрии; анализ и геологическая интерпретация параметров оптимальной модели.

Априорная геолого-геофизическая модель Оболонской астроблемы. В качестве основы для создания структурной геолого-геофизической модели Оболонской астроблемы были использованы результаты площадных сейсмических исследований 3D [3], которые позволили уточнить пространственное положение основных структурно-литологических комплексов астроблемы (рис. 2). Так, отражающий горизонт VII(PR) в верхней части кристаллического фундамента отождествляется с кровлей пород мишени; отражающий горизонт $Vb_2(C_2b)$ – с кровлей отложений башкирского яруса среднего карбона; отражающий горизонт $\Pi_{в-п}(J_2bs)$ в нижней части отложений байосского яруса средней юры – с кровлей отложений коптогенного комплекса; а отражающим горизонтам $\Pi_{в1}(J_2bt)$ и $\Pi_{б}(J_3oxf)$ в нижней части батского яруса средней юры и нижней части оксфордского яруса верхней юры соответствуют породы заполняющего комплекса.

Количественная оценка распределения геоплотностных свойств априорной модели Оболонской астроблемы базировалась как на указанных сейсмических данных, так и на материалах ранее выполненных тематических геофизических и петрофизических исследований [10], а также на результатах геофизических исследований поисковых скважин 5301 и 5302. Учитывая отсутствие керна из указанных скважин, для оценки распределения плотностей непосредственно в пределах Оболонской астроблемы использованы результаты интерпретации данных комплекса ГИС, выполненного по скважинам 5301

и 5302. Для оценки плотности горных пород использована связь параметра $\alpha_{\text{ПС}}$ с пористостью, а последней с плотностью. Эталонном для установления соотношения между $\alpha_{\text{ПС}}$, коэффициентом пористости (Кп) и плотностью (σ) послужили данные ГИС и керны по скважине 232 Белоцерковская, расположенной в непосредственной близости от Оболенской впадины [3]. В результате анализа получена зависимость:

$$\sigma = 2,735 - 0,0187K_{\text{п}},$$

по которой были рассчитаны кривые плотности по скважинам 5301 и 5302 (рис. 3, а). По этим же скважинам выполнен расчет плотности отложений по значениям пластовых скоростей на основе соотношения Гарднера:

$$\sigma = aV^{\frac{1}{4}},$$

в котором плотность имеет размерность г/см³, V – средняя скорость в м/с, a – коэффициент, который выбран по результатам адаптации к фактическим

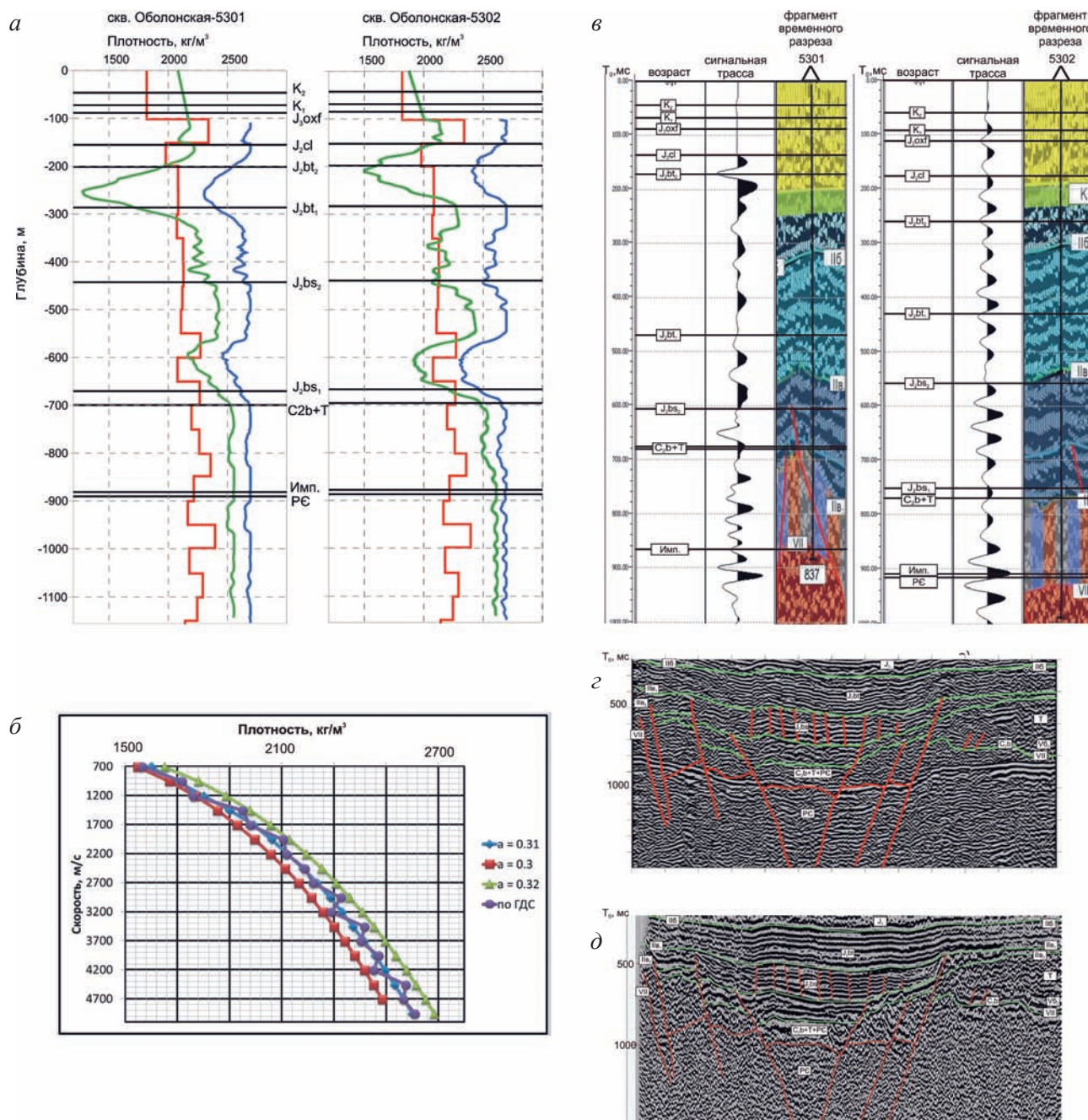


Рис. 3

К определению априорных плотностных параметров 3D-модели Оболенской площади по скважинам 5301 и 5302. Пересчет скорости продольных волн в плотность (а); выбор оптимального коэффициента в формуле Гарднера (б); результаты сейсмического моделирования 1D (в); синтетический временной разрез по линии инлайна 234 (д); временной разрез по линии инлайна 234 (д)

— плотность по данным $\alpha_{\text{ПС}}$;
— плотность, рассчитанная по формуле Гарднера;
— плотность по результатам 1D-моделирования

данным (рис. 3, б) с последующим согласованием рассчитанных плотностей с измеренными сейсмическими данными на основе одномерного сейсмического динамического моделирования (рис. 3, в).

Для оценки качества и адекватности созданной априорной пространственной геоплотностной модели исходным геофизическим данным проведены расчеты прямой пространственной задачи гравиметрии и квазипространственной прямой динамической задачи сейсморазведки. Качественное – по сейсмическим (рис. 3, г, д) и количественное – по гравиметрическим данным сопоставление рассчитанных и зарегистрированных полей показало их принципиальное соответствие. При этом среднеквадратическое отклонение между измеренным и рассчитанным гравитационными полями составило $1,41 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$, что указывает на достаточное хорошее качество созданной априорной модели.

Дальнейшее уточнение параметров априорной модели было выполнено на основе решения пространственной линейной обратной задачи интегральной интерпретации комплекса сейсмических, скважинных и гравиметрических данных в критериальной постановке [5], которая предусматривает нахождение оптимальных параметров геоплотностной модели среды относительно гравитационного поля и комплекса дополнительных геолого-геофизических сведений:

$$\begin{cases} A\xi(x) = u(s) \\ J(\xi(x) - \eta(x)) \Rightarrow \min, \end{cases}$$

где $\xi(x)$ – модель среды, $u(s)$ – наблюдаемое геофизическое (гравитационное) поле, $J(\xi(x) - \eta(x)) \Rightarrow \min$ – критерий оптимальности, $\eta(x)$ – модель начального приближения.

Дополнительная геологическая информация учитывалась в виде параметров критерия оптимальности $J(\cdot)$, обеспечивая единственность и геологическую содержательность полученной 3D-модели среды.

Показателями качества полученной пространственной геоплотностной модели Оболонской площади являются среднеквадратическая погрешность подбора гравитационного поля $0,066 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$, что соответствует погрешности выполненных высокоточных гравиметрических исследований масштаба 1:10 000 ($\pm 0,019 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$) (рис. 4, а-в), и нормальный характер распределения отклонений между рассчитанным и наблюдаемым гравитационными полями (рис. 4, г).

Анализ особенностей поведения геоплотностных свойств пород различных литолого-стратиграфических комплексов Оболонской астроблемы позволил уточнить существующие представления о ее глубинном строении, включая образования фундамента и осадочный комплекс, а также выполнить прогнозирование пространственного размещения участков и интервалов геологического разреза, которые характеризуются улучшением коллекторских свойств и повышенной вероятностью нефтегазонасыщения.

Методика комплексного анализа особенностей поведения параметров интегральной геоплотностной модели. Характер поведения геоплотностных свойств образований фундамента и пород осадочного комплекса в пределах Оболонской площади изучался на основе анализа вертикальных разрезов, горизонтальных и погоризонтных, конформных характеру напластования пород, срезов (рис. 5).

Особенности поведения геоплотностных свойств в пределах глубоко погруженных образований фун-

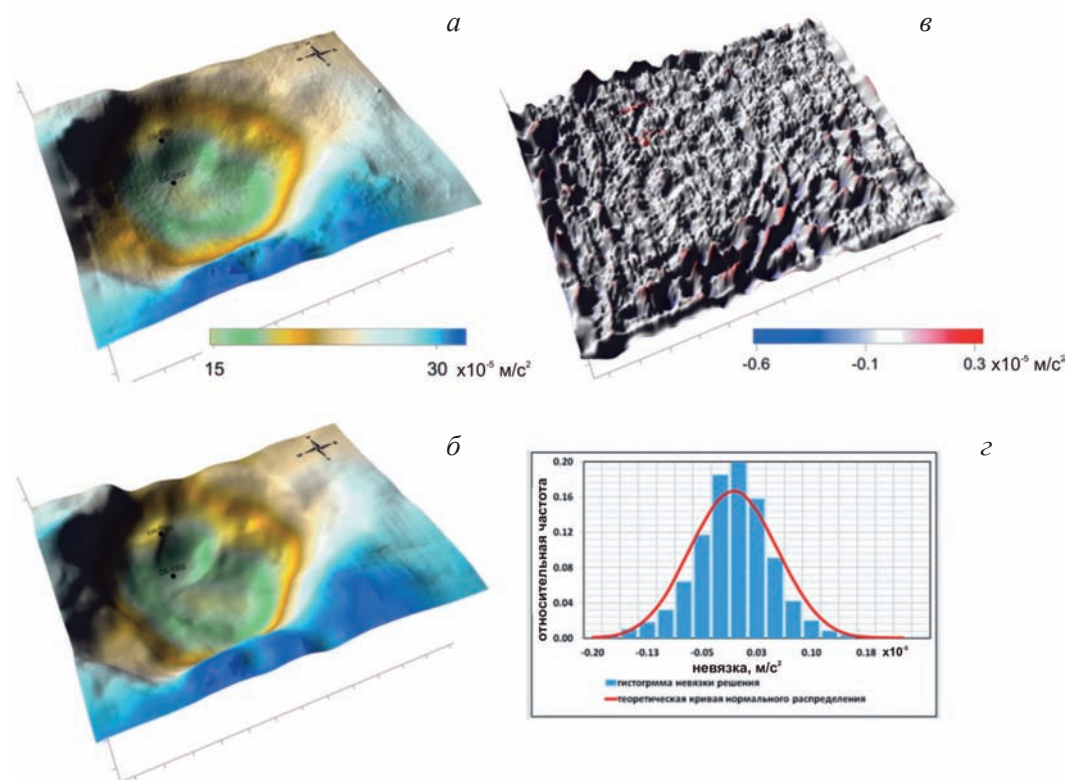


Рис. 4.
Гравитационные поля:
наблюдаемое (а),
рассчитанное (б),
невязка полей (в),
гистограмма
распределения невязок (г)

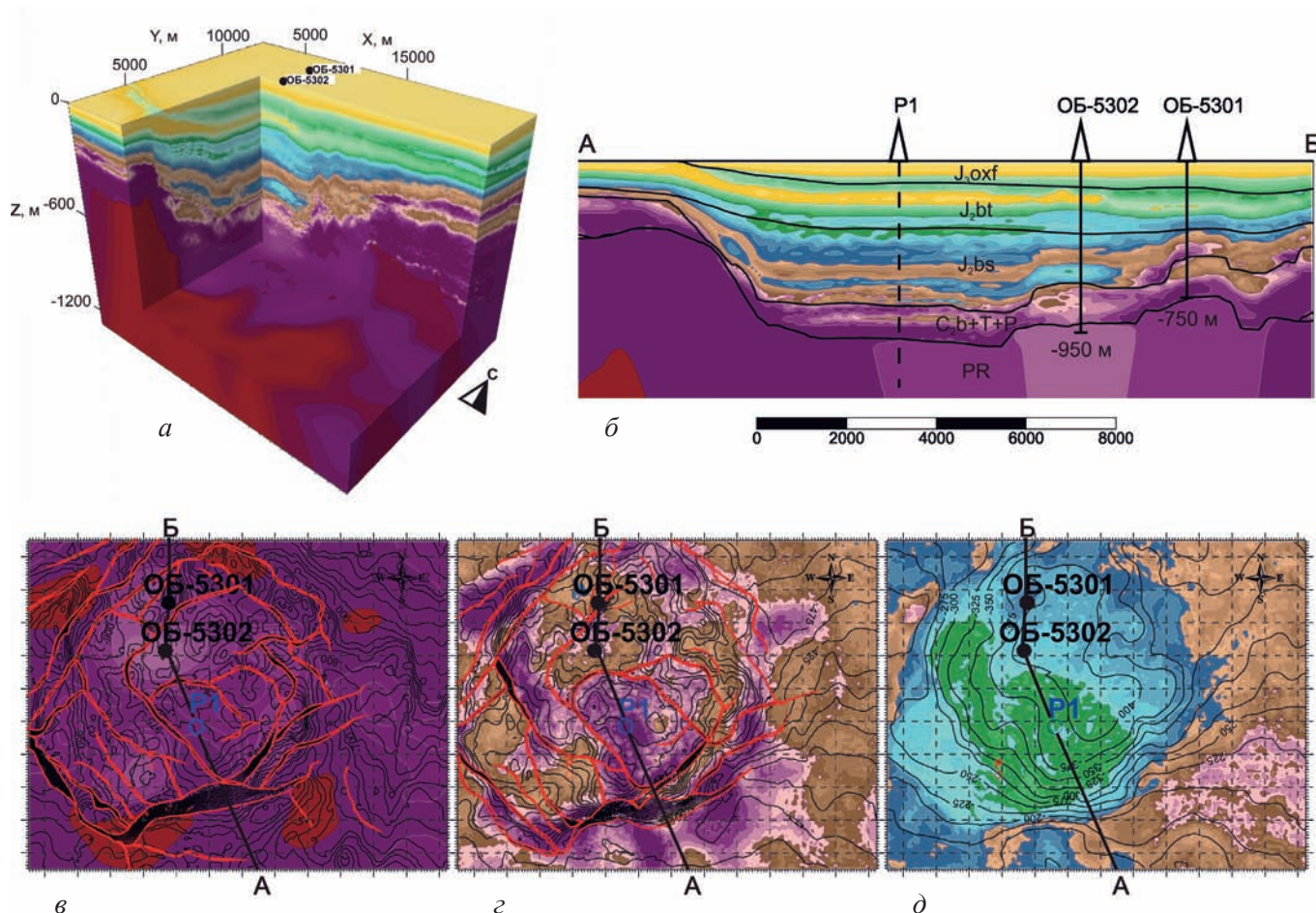


Рис. 5.

Представление 3D-модели Оболонской площади:

аксонометрическое изображение (а), разрез по линии АБ (б), конформные геоплотностные срезы в кровле фундамента (в), по коптогенному комплексу (г), по байоисским песчаникам (д)



дамента позволили закартировать элементы блокового строения Оболонской впадины и выделить две региональные зоны разуплотнения (рис. 6, а), одна из которых расположена в пределах центральной части впадины и прослеживается до глубины 5000 м, а другая, в юго-западной части, прослеживается до глубины 3500–4000 м. Характер размещения указанных зон разуплотнения позволяет предположить, что при столкновении с Землей космическое тело состояло из двух частей и что места падения этих осколков следует связывать с центрами выделенных зон. Дополнительно удалось выделить отдельные блоки, которые находились в различных условиях метаморфизма (рис. 6, а) [1].

Высокая степень геологической содержательности созданной модели в части описания образований фундамента позволила перейти к этапу изучения особенностей строения отложений осадочного комплекса и прогнозированию развития потенциальных ловушек углеводородов как участков геологического разреза, которые характеризуются улучшением коллекторских свойств и соответствуют зонам пониженной плотности пород (рис. 5, г, д). С целью ранжирования закартированных объектов с точки зрения очередности их опосредования глубоким бурением дополнительно были использованы результаты магнитометрической, геохимической, эманационной и термометрической съемок [9],

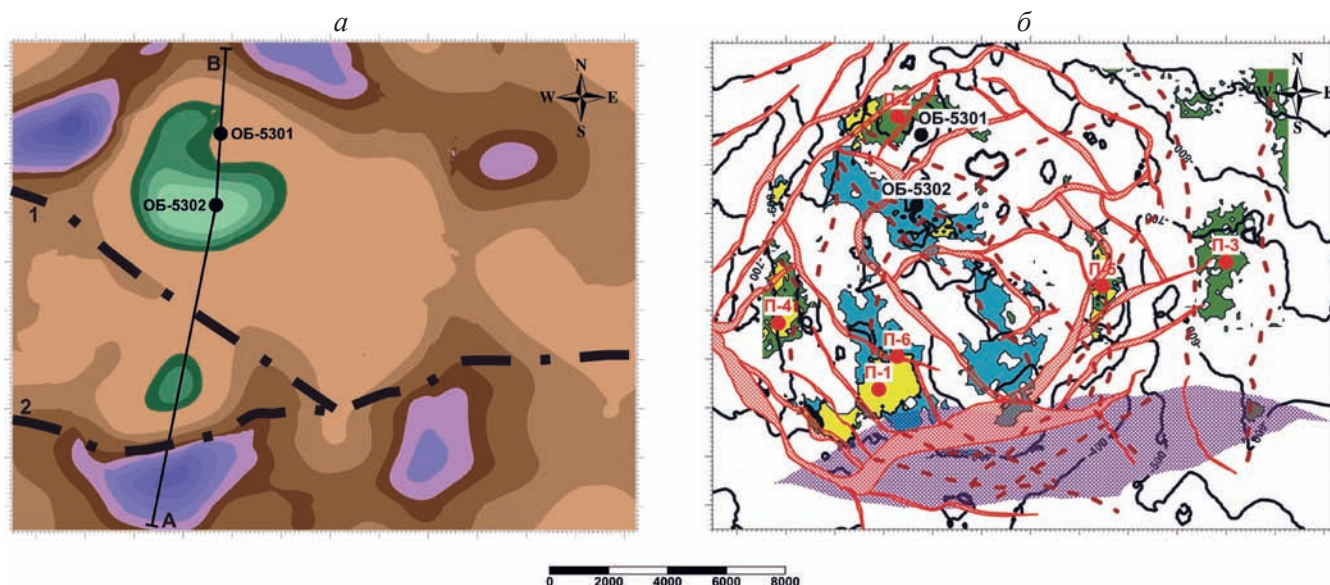
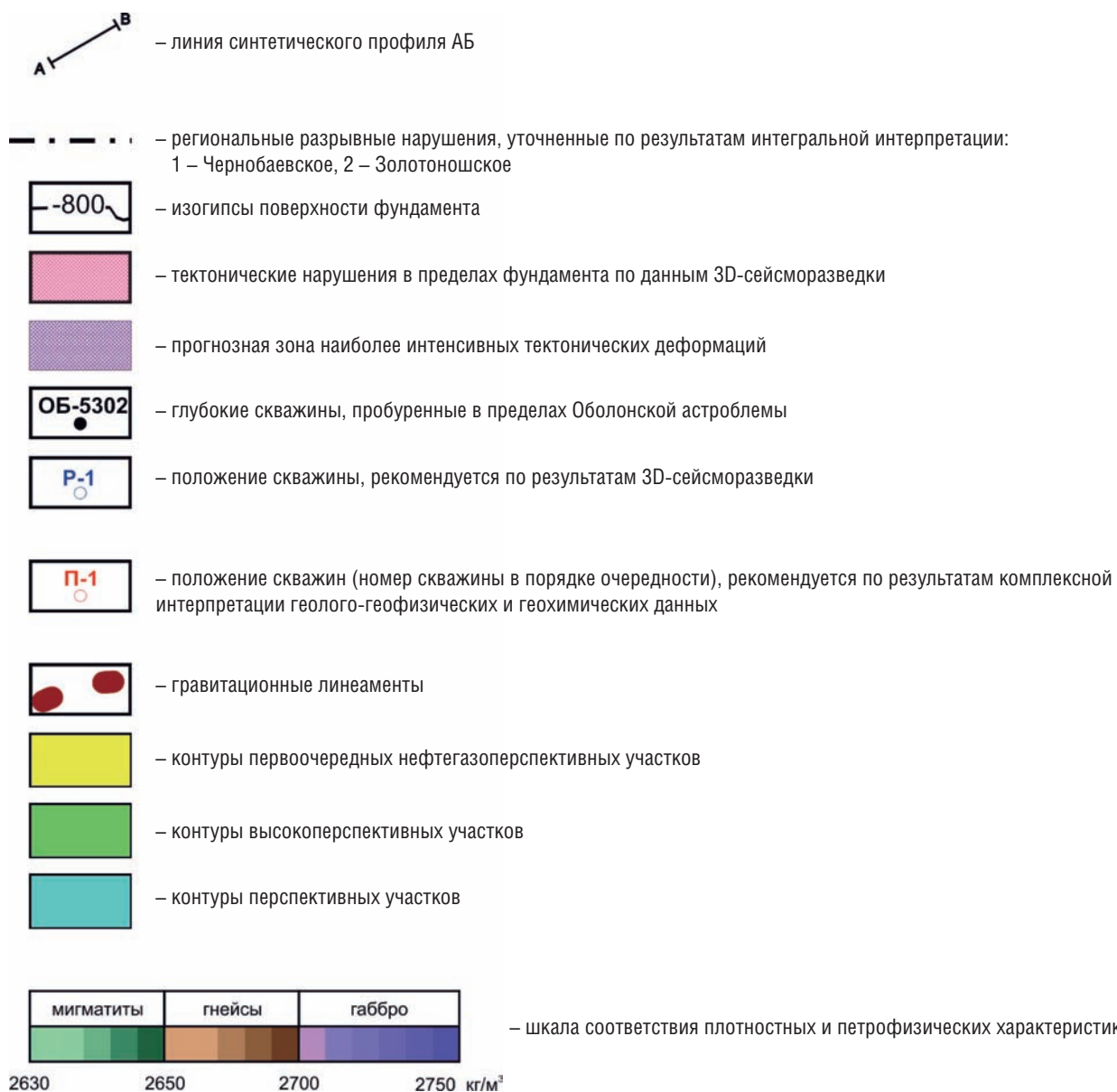


Рис. 6.

К результатам комплексной интерпретации пространственной геолого-геофизической модели Оболонской площади: петрографическая классификация пород фундамента (а); размещение нефтегазоперспективных объектов (б)



которые рассматривались в качестве индикаторов благоприятных условий для углеводородонасыщения закартированных резервуаров.

Для каждого из полей указанных параметров были проведены корреляционно-статистический анализ и разделение на классы с использованием технологии COSCAD [7]. Всего было выделено семь классов. Окончательное отнесение участка территории – класса – к нефтегазоперспективным выполнялось с учетом размера участка, наличия благоприятных структурных условий, приуроченности к стабильным тектоническим зонам, степени наследования пространственного размещения прогнозных зон в различных стратиграфических комплексах.

Геологические результаты. В результате анализа особенностей строения Оболонской площади было закартировано семь участков, которые были разделены на три группы – перспективные, высокоперспективные и первоочередные (рис. 6, б). Первоочередным для опробования бурением определен участок №1, расположенный в юго-западной части Оболонской впадины. Участок характеризуется наличием интенсивных аномалий понижения плотности, что указывает на наличие благоприятных условий для развития пород-коллекторов, приуроченных к отложениям байосса и коптогенного комплекса, а также к прогнозной зоне дробления в образованиях фундамента.

Наличие в пределах участка положительной температурной аномалии, практическое отсутствие аномалий радона, CO_2 и углеводородных газов интерпретировалось как положительный признак тектонической стабильности блока и наличия условий для аккумуляции и сохранения залежей УВ. В пределах участка расположены четыре тектонических блока, ограниченные разломами северо-западного простирания. В пределах самого большого по размерам блока локализуется замкнутое изогипсой – 825 м поднятие изометрической формы 2,2 км в диаметре, а на уровне горизонта $\Pi_{\text{в-п}}$ (поверхность коптогенного комплекса) – приразломная полуантиклиналь размерами 2,5 х 2 км. Подобные объекты на этих же уровнях, но меньших размеров, локализуются в смежном, более опущенном блоке. Именно в пределах этих блоков рекомендуется бурение первоочередной поисковой скважины П-1 до глубины 4000 м и зависимой от нее скважины П-6.

Что касается перспектив нефтегазоносности фундамента, то нижняя граница зоны наибольшего разуплотнения пород на участке №1 по данным моделирования достигает глубины 3–4 км. В пользу перспективности этой зоны свидетельствует наличие в пределах Оболонской площади в докембрийском комплексе узкой субмеридионально-вытянутой палеопротерозойской Оболонской грабен-синклинойной зоны, которая формировалась и развивалась вдоль серии субмеридиональных разломов. В пределах этой зоны выделяется несколько малоразмерных магнитных аномалий, которые могут свидетельствовать о наличии погребенных интрузий основного и ультраосновного состава, характерных для Ингульского мегаблока Украинского щита [9]. В соответствии с принятыми моделями

формирования импактных структур [11] после падения метеорита наиболее проницаемыми участками для последующей миграции мантийных флюидов считаются места пересечения кольцеобразной системы разломов, образовавшихся в результате столкновения метеорита с Землей, с существовавшими на момент столкновения более древними разломами. Выделенный перспективный участок №1 расположен как раз в непосредственной близости от такого места.

Кроме первоочередного участка №1 в пределах Оболонской площади закартирован высокоперспективный участок №2, расположенный на север от скважины 5302. В контур этого участка попадают три тектонических блока, ограниченных разломами северо-восточного простирания. С позиции перспективности наибольший интерес представляет центральный блок, который в плане имеет форму треугольника, в пределах которого на уровне поверхности коптогенного комплекса (горизонт $\Pi_{\text{в-п}}$) по сейсмическим данным закартирована сложная построенная антиклинальная структура. Высокоперспективный участок №3 расположен в восточной части площади и в тектоническом отношении приурочен к валу, обрамляющему Оболонский кратер. Отметим, что значительная часть залежей УВ в астроблемах мира приурочена именно к обрамляющим их валоподобным поднятиям [11]. Основные перспективы нефтегазоносности этого участка связываются с ловушками литологического типа в отложениях коптогенного комплекса. На уровне рельефа поверхности фундамента, который залегает здесь на глубинах –650 – –750 м, сейсморазведкой выделяются два валообразных поднятия, разделенные неглубоким прогибом. В пределах участка №3 рекомендуется бурение поисковой скважины П-3 глубиной 1000 м. Высокоперспективные участки №4 и №5 выделяются в западной и восточной прибортовых частях Оболонской впадины соответственно. Основные перспективы участка №4 связываются с увеличением толщины пластов в отложениях коптогенного комплекса. В пределах участка №5 аномальные зоны разуплотнения на уровне верхней части фундамента и коптогенного комплекса вытянуты вдоль разломов, ограничивающих Оболонскую впадину. Здесь также наблюдается пересечение кольцевых разломов с более древними субширотными тектоническими нарушениями, что повышает перспективность образований пород фундамента с точки зрения наличия в них коллекторских свойств.

Выводы. В результате проведенных исследований разработан и опробован на примере Оболонской импактной структуры оптимальный комплекс детальных геофизических исследований для изучения как традиционных, так и нетрадиционных резервуаров нефти и газа, который включает сейсмические, грави- и магнитометрические наблюдения, а также геохимические измерения с последующей комплексной интерпретацией на основе «Технологии интегральной интерпретации комплекса геолого-геофизических данных при поисках и разведке нефтяных и газовых месторождений» [8].

Создание пространственной интегральной геолого-геофизической модели Оболонской астроблемы позволило выделить и обосновать новые нефтегазо-перспективные объекты в образованиях фундамента, осадочного чехла и валоподобного поднятия кратера. На основе рейтинговой оценки среди нефтегазоперспективных объектов выделены первоочередные для постановки глубокого бурения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анищенко Ю.В. Оболонская астроблема: применение 3D-геомоделирования и инверсии для решения вопроса нефтегазоносности / Ю.В. Анищенко, Т.А. Федченко, Н.С. Ганженко [и др.] // Геодинаміка. 2013. №2(15). С. 81–83.
2. Гуров Е.П. Заполняющий комплекс и закратерные отложения Оболонской импактной структуры / Е.П. Гуров, Е.П. Гурова [и др.] // Геол. журнал. 2007. №4. С. 48–59.
3. Звіт про виконані сейсморозвідувальні роботи на Оболонській площі за технологією 3D / Г.Г. Маркова, М.М. Здоровенко, М.П. Фурманчук [та ін.]. м. Київ, 2011. 157 с.
4. Краюшкин В.А., Гуров Е.П. К перспективе поиска нефти и газа в астроблемах Украины // Геол. журнал. 1989. №1. С. 17–27.
5. Кобрунов А.И., Петровский А.П. Методы и результаты интерпретации геофизических данных // Интерпретация гравитационных и магнитных полей: сб. науч. тр. / Отв. ред. В.Н. Страхов, В.И. Старостенко. Киев: Наук. думка, 1992. С. 156–161. ISBN 5-12-001914-5.

6. Масайтис В.Л. Геология астроблем / В.Л. Масайтис, А.Н. Данилин, Г.М. Карпов [и др.]. Л.: Недра, 1980. 230 с.
7. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации // Геофизика. 2000. №4. С. 29–33.
8. Петровский А.П. Математические модели и информационные технологии интегральной интерпретации комплекса геолого-геофизических данных (на примере нефтегазоперспективных задач): дис. ... на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук: 04.00.22. НАН Украины, 2006.
9. Температурные и атмогеохимические индикаторы приповерхностной разгрузки флюидогазовых потоков и их значение для поисков залежей углеводородов // Багрий И.Д., Дубосарский В.Р., Знаменская Т.А. и др. Нафта і газ України. Матер. 8-ої Міжнародн. наук.-практ. конф. «Нафта і газ України». – Судак, 29 вересня – 1 жовтня 2004 р. Т. 1. Київ: УНГА. 2004. С. 275.
10. Шемет В.Г., Омельченко В.В. Результаты комплексных геофизических исследований в межах південного борту ДДЗ на ділянці Білоцерківка-Левенцівка (2004-2008; титул 223/04), м. Дніпропетровськ, 2008.
11. Richard R. Donofrio. North American impact structures hold giant field potential // Oil & Gas Journal – May 11, 1998. P. 69–83.

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор физико-математических наук
А.В. Петров

ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОВСКИЙ

Александр Павлович



Окончил ИФНТУНГ в 1984 г. Профессор, академик Украинской нефтегазовой академии, заведующий кафедрой полевой нефтегазовой геофизики Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, доктор физико-математических наук. Область научных интересов – математические методы и компьютерные технологии создания интегральных 3D-геолого-геофизических моделей нефтегазоносных территорий и объектов. Автор и соавтор 136 научных публикаций, включая учебные пособия, статьи, тезисы конференций.

ФЕДЧЕНКО

Татьяна Александровна



Окончила ИФНТУНГ в 2005 г. Доцент кафедры полевой нефтегазовой геофизики Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, член-корреспондент Украинской нефтегазовой академии, кандидат физико-математических наук. Область научных интересов – математические методы и компьютерные технологии создания интегральных 3D-геолого-геофизических моделей нефтегазоносных территорий и объектов. Автор и соавтор более 30 публикаций, включая статьи и тезисы конференций.

ГАНЖЕНКО

Наталья Степановна



Окончила ИФНТУНГ в 1970 г. Доцент кафедры полевой нефтегазовой геофизики Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, кандидат технических наук. Область научных интересов – обработка сейсмических данных 2D и 3D, комплексная интерпретация результатов геолого-геофизических исследований. Автор и соавтор более 30 научных публикаций, включая учебные пособия, статьи, тезисы конференций.

АНИЩЕНКО

Юрий Викторович



Окончил Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко в 1987 г. Аспирант кафедры полевой нефтегазовой геофизики Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа. Область научных интересов – комплексная интерпретация результатов геолого-геофизических исследований. Автор четырех публикаций.