

Прогнозирование залежей углеводородов в кристаллическом фундаменте ДДВ по комплексу геофизических и космических материалов

Б.С. Бусыгин, С.Л. Никулин, И.Н. Гаркуша

Национальный горный университет, Днепрпетровск, Украина

E-mail: busyginb@yandex.ru

Приведены элементы компьютерной технологии и некоторые результаты прогноза скоплений углеводородов в кристаллическом фундаменте северного склона Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ). Установлена приуроченность углеводородных объектов к зонам повышенной плотности линеаментов гравитационного поля и цифровой модели рельефа, полученной путем обработки космического радарного снимка SRTM. Показана целесообразность использования, наряду с традиционными геолого-геофизическими материалами, результатов космической съемки в тепловом диапазоне спектра. Построена прогнозная карта, отражающая положение участков, наиболее перспективных на обнаружение новых нефтегазовых объектов.

Ключевые слова: Днепровско-Донецкая впадина (ДДВ), углеводородные залежи, компьютерное прогнозирование, линеаменты, тепловые космические снимки, дистанционное зондирование, геолого-геофизические данные.

Введение

Днепровско-Донецкая впадина является наиболее изученной нефтегазоносной провинцией Украины, на территории которой обнаружены сотни углеводородных залежей. Большинство из них связано с осадочным чехлом ДДВ, и хотя до сих пор имеется возможность обнаружения в нем новых залежей, все больший интерес вызывают залежи нетрадиционного типа, связанные с породами фундамента.

Существует несколько основных гипотез возникновения углеводородных объектов фундамента. Согласно одной, высокомолекулярные нефтяные углеводороды и их промышленные скопления сформированы путем абиогенного синтеза из простейших соединений (метан, этан, пропан и др.), возникающих внутри Земли, до более сложных (Чебаненко, 1981). Согласно другой гипотезе (Шустер и др., 2003), залежи в фундаменте образовались в результате вертикальной миграции углеводородов из осадочного чехла.

В условиях ДДВ наиболее перспективными территориями для поисков углеводородов в фундаменте и надфундаментной толще считаются склоны впадины. Так, в пределах северного склона на территории шириной 100 км и длиной 600 км в настоящее время открыто более 65 залежей, из которых более чем в 20 получены притоки нефти и газа из фундамента. Этот факт определяет интерес к выполнению исследований на территории северного склона ДДВ.

По результатам бурения выяснено, что залежи углеводородов в фундаменте ДДВ в большинстве случаев тяготеют к: 1) участкам развития трещиноватых измененных вторичными процессами пород, приуроченным к разрывным нарушениям и коре выветривания линейного типа, которая развивается по линии разрывных нарушений; 2) зонам и участкам

развития интенсивно измененных пород в пределах тектонически нарушенных участков и приуроченной к ним коре выветривания трещинно-площадного типа.

Таким образом, безотносительно к гипотезе образования углеводородных залежей фундамента важное значение для их формирования имеют тектонические нарушения либо как каналы поступления углеводородов в места их скопления, либо как ловушки непосредственно (в частности, линейные коры выветривания), либо как структуры, определяющие формирование ловушек в вышележащей осадочной толще. В связи с этим особый интерес представляет изучение отдельных разрывных нарушений фундамента и осадочного чехла, а также их зон. Оно может проводиться как традиционными наземными геофизическими методами, так и с привлечением космических снимков в оптическом, ближнем инфракрасном, радиоволновом и тепловом диапазонах. Первые три позволяют дешифрировать зоны нарушения сплошности по косвенным ландшафтным индикаторам. Целесообразность привлечения съемок в тепловом диапазоне связана с существованием тепловых аномалий, обусловленных высокотемпературными гидро- и газодинамическими потоками, поднимающимися из глубин вдоль тектонически ослабленных зон.

Материалы и методы

Исследуемая территория размером 310×190 км охватывает, кроме северного склона ДДВ, фрагмент нефтегазоносных центральной и южной частей ДДВ, а также части Донецкого складчатого сооружения. Северный склон ДДВ в южной части ограничен краевым региональным нарушением, а его северная часть постепенно переходит к южному склону Воронежского кристаллического массива. Глубина поверхности моноклинально залегающего фундамента на территории северного склона ДДВ увеличивается с севера на юг и в районе краевого регионального нарушения достигает 2,5–3,0 км. Территория разделяется на несколько мегаблоков, границами которых являются глубинные разломы. В целом породы фундамента характеризуются низкими значениями пористости (около 2%), однако она возрастает в коре выветривания и зонах разрывных нарушений, достигая 3–5%, а в некоторых случаях 20%.

В качестве исходных геоданных использованы геологические схемы, карта гравитационного поля V_z в масштабе 1 : 1 000 000 и цифровая модель рельефа дневной поверхности в масштабе 1 : 200 000, тепловые космические снимки MODIS с разрешением 1000 м (рис. 1), а также данные о расположении 26 скважин, в которых были получены притоки нефти из фундамента (рис. 2). Все данные предварительно преобразовывались в сеточную форму представления; при этом изучаемая территория представляется в виде регулярной сети, состоящей из совокупности прилегающих друг к другу элементарных ячеек, каждой из которых ставится в соответствие вектор измеренных или рассчитанных геоданных (признаков). Прогнозирование углеводородных структур промышленного значения в фундаменте выполнялось в масштабе 1 : 200 000 с использованием специализированной геоинформационной системы и технологии РАПИД, разработанной в Государственном высшем учебном заведении «Национальный горный университет» (Pivnyak et al., 2010).

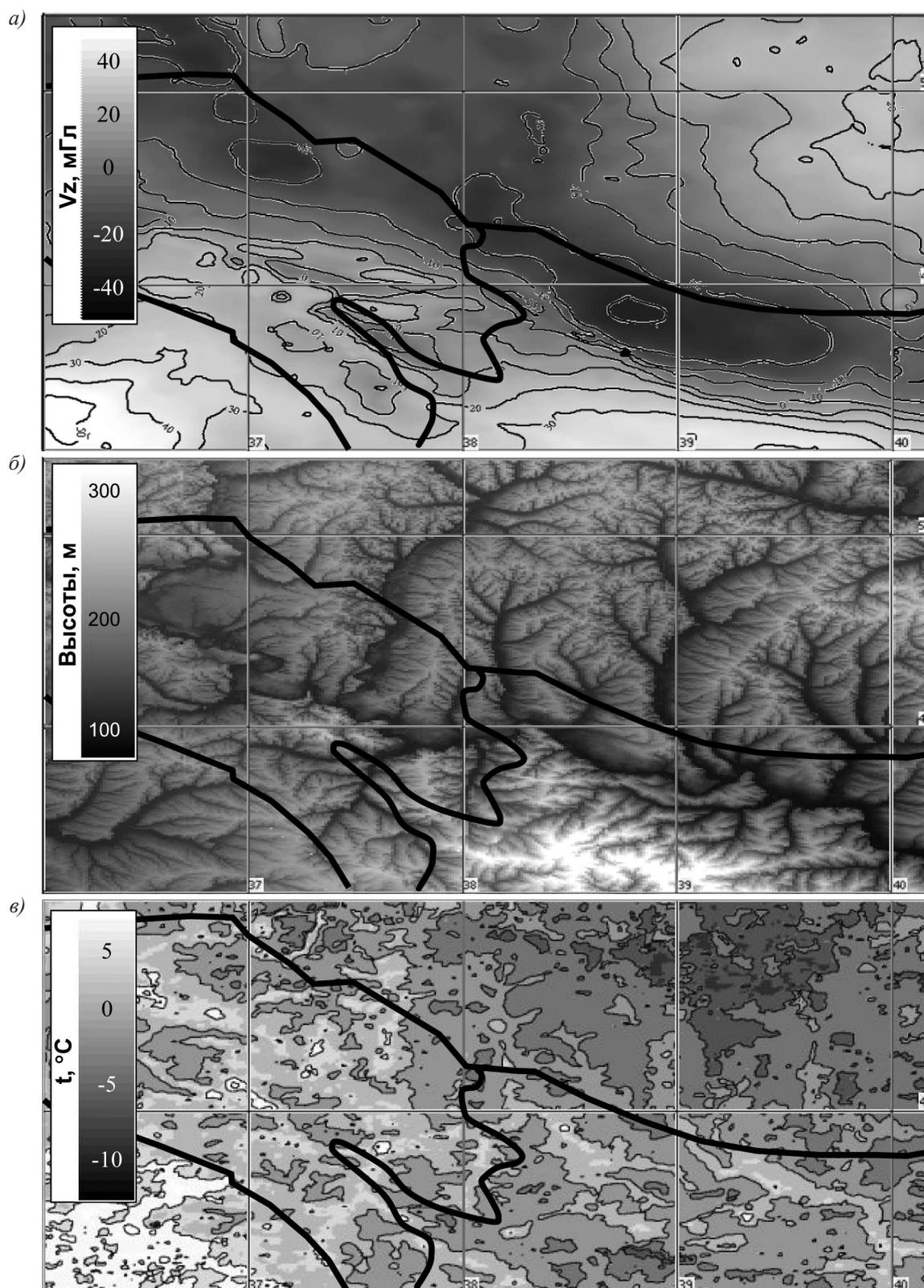


Рис. 1. Исходные данные: а) карта гравитационного поля;
 б) цифровая модель рельефа; в) пример теплового канала снимка (MOD11A2,
 дневные снимки, март 2012 г.)

Технология прогнозирования (Пивняк и др., 2007; Busygin et al., 2010) базируется на методах Data Mining, в первую очередь на многомерной классификации с обучением. Последняя позволяет на основе некоторого решающего правила отнести объекты территории

к одному из взаимоисключающих классов (задача категорийного прогноза или распознавания) либо оценить степень принадлежности объектов к некоторому классу в предположении, что объект может принадлежать одновременно одному или нескольким классам (задача нечеткого прогноза или ранжирования). Под классом понимается совокупность геологических объектов, обладающих сходными характеристиками. На практике класс определяется через эталонную выборку – совокупность объектов территории с заведомо известными свойствами. Для проведения классификации необходимо наличие минимум двух классов, один из которых представляет известные целевые объекты, а второй – нецелевые (т.е. участки территории, для которых вероятность обнаружения искоемых объектов или свойств низка).



Рис. 2. Сеть линеаментов, совмещенная с картой их плотности (рассчитана в скользящем окне 14×14 км)

Многомерная классификация выполняется в пространстве так называемых признаков – измеренных или рассчитанных геоданных, заданных в сеточной форме. Получаемые в результате классификации прогнозы представляют собой карты, отражающие принадлежность объектов территории введенным классам или степень принадлежности объектов одному из них.

Для выполнения многомерной классификации исследуемой территории формировались: 1) система признаков (материалы наземных и космических съемок и их трансформанты), 2) эталонные выборки классов, которые подразделяются на обучающие, используемые для формирования решающего правила классификации, и контрольные, применяемые для оценки адекватности прогнозов, а также 3) информативные наборы признаков.

Генерация системы признаков является важнейшим технологическим этапом, поскольку способность признаков адекватно описывать изучаемые явления, объекты или процессы определяет качество и содержательность получаемых прогнозов. Несмотря

на рост разнообразия и объемов выполняемых съемок, признаковое пространство, сформированное только из наблюдаемых признаков, в большинстве случаев не обладает достаточной информативностью для качественного решения прогнозно-поисковых задач. Решить эту проблему можно путем вычисления трансформант исходных признаков, которые в большей степени отражали бы те или иные существенные аспекты изучаемого явления или процесса

Для гравитационного поля и рельефа выполнялись разнообразные математические трансформации – дифференциальные, текстурные, гистограммные, морфологические, корреляционные, фрактальные и др. (Pivnyak et al., 2010).

Отдельный этап исследований включал выделение и анализ линеаментов, которые отражают зоны нарушения сплошности пород, а потому представляют особый интерес. В интерактивном режиме выделялись линейные элементы рельефа и низкочастотной составляющей гравитационного поля (в большей степени отражающей неоднородности фундамента, а не осадочного чехла). Далее линеаменты обоих типов объединялись с единой системой с преобладающими азимутами 0, 45, 90 и 135 градусов (*рис. 2*) и служили основой для расчета ряда характеристик, в том числе плотности линеаментов внутри скользящего окна. Как видно на *рис. 2*, проявления нефтегазоносности фундамента в большинстве случаев приурочены к положительным аномалиям данной характеристики.

В число признаков были включены результаты космической съемки в тепловом (дальнем инфракрасном) диапазоне спектра. Каждый отдельный снимок, созданный по технологии MOD11A2, представляет результат осреднения значений температуры земной поверхности над изучаемой территорией за 8-дневный интервал. Использовалось 16 снимков, сделанных в период с ноября по март в течение 2009–2012 гг.; из них восемь делались в дневное время суток и восемь – в ночное. Совместное использование большого количества снимков, сделанных на протяжении ряда лет, позволяет снизить влияние случайных и псевдослучайных факторов (кратковременные изменения климатических условий, единичные выбросы тепла техногенного происхождения, наличие / отсутствие снежного покрова и т.п.). Для совокупности снимков рассчитан ряд статистических показателей, среди которых наибольший интерес представляет дисперсия разброса 16-мерных векторов, составленных из значений разновременных снимков в отдельных пикселях, попадающих внутрь скользящего окна размером 6×6 км (*рис. 3*). Минимальные значения дисперсии зафиксированы в областях расположения скважин с установленной нефтегазоносностью фундамента. Данные области характеризуются минимальными колебаниями температуры, что может свидетельствовать о большом вкладе некой постоянной составляющей, обусловленной, по всей видимости, существованием постоянного теплового потока из недр.

Всего было получено 322 признака всех указанных выше типов.

В качестве объектов обучающей выборки служили узлы сети, ближайшие к устьям скважин с зафиксированными притоками нефти. Ввиду неоднородности условий залегания известных углеводородных объектов обучающая выборка целевого класса была разделена на три подвыборки. В первую вошли объекты, находящиеся в пределах северного склона

ДДВ, во вторую – на территории центральной части ДДВ, в третью – Донецкого складчатого сооружения. Выборку нецелевого класса составили объекты, случайным образом расположенные на исследуемой территории.

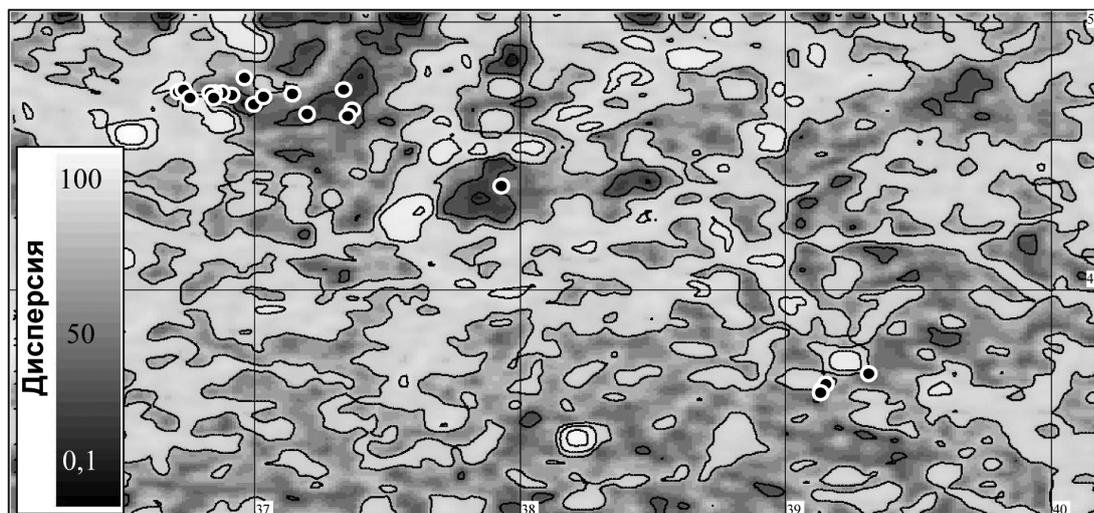


Рис. 3. Характеристика теплового поля (дисперсия разброса 16-мерных векторов, составленных из значений разновременных снимков)

Далее выполнялась коррекция состава обучающих выборок с целью повышения их компактности в многомерном пространстве имеющейся системы признаков, что практически всегда обеспечивает увеличение точности прогнозов. В результате 3-я выборка была присоединена к 1-й, а восемь объектов, существенно нарушающих компактность, были выведены из их состава и сформировали контрольную выборку (рис. 4).

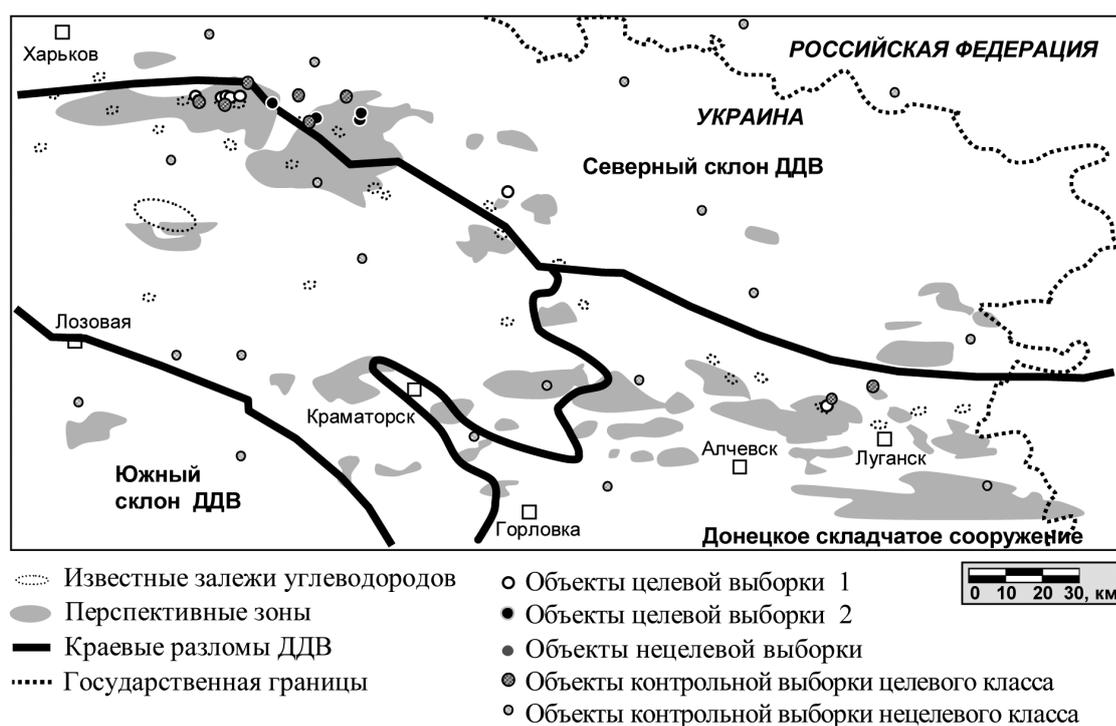


Рис. 4. Положение перспективных зон на исследуемой территории

Количество объектов обучающей выборки 1-го целевого класса составило 18, 2-го – 4; нецелевого – 42; в контрольную выборку целевого класса вошли восемь объектов, нецелевого – 20.

На следующем этапе с использованием специальных методик выполнялся поиск информативных наборов признаков. Цель этапа – выделение из имеющихся признаков тех, которые существенны с точки зрения решения поставленной задачи и минимизируют рассчитываемую некоторым образом функцию потерь. В качестве последней использовалась ошибка классификации, т.е. процент объектов обучающих выборок (целевых и нецелевых), неверно классифицированных с использованием фиксированного решающего правила.

На практике процедура поиска информативного набора выполняется любым из известных методов поиска оптимальных систем признаков (последовательного присоединения, последовательного отбрасывания, случайного поиска, случайный поиск с адаптацией, присоединения с отбрасыванием, ветвей и границ и т.п.). Для этого организуется итерационный процесс, и на каждом его шаге ищется набор, при котором минимизируется ошибка классификации.

Информативные наборы рассчитываются отдельно для каждого целевого класса с использованием различных решающих правил, что позволяет найти не только оптимальный набор признаков, но и решающее правило, обеспечивающее наивысшую точность прогноза.

В набор для 1-й обучающей выборки вошли: p'_1 – показатель анизотропии сети линейных элементов, рассчитываемый как $A_1 = (d_0^2 + d_{45}^2 + d_{90}^2 + d_{135}^2) - (d_0 + d_{45} + d_{90} + d_{135})^2$, где $d_0, d_{45}, d_{90}, d_{135}$ – плотности разнонаправленных линейных элементов; p'_2, p'_4 – тепловые снимки MODIS: день, январь 2011 г.; ночь, ноябрь 2011 г.; день, февраль 2010 г.; p'_5 – вторая вертикальная производная остаточного гравитационного поля. В информативный набор для 2-й обучающей выборки вошли четыре признака: p''_1 – тепловой снимок MODIS (ночь, ноябрь 2011); p''_2 – показатель анизотропии сети линейных элементов $A_2 = |d_0 - d_{90}| + |d_{45} - d_{135}|$; p''_3 – дисперсия разброса температуры по 16 тепловым снимкам MODIS (в окне 10×10 км); p''_4 – трансформация «типы поверхности» для гравитационного поля Vz . Ошибка классификации для первого набора составила 11,32%, для второго – 10,26%.

На *рис. 5* приведены фрагменты диаграмм, отражающих ошибки классификации объектов обучающих выборок, получаемые при использовании наборов разной размерности и состава; как следует из рисунка, оптимум функции потерь достигается при использовании признаков p'_1, p'_5 для обучающей выборки 1-го класса и p''_2, p''_4 – 2-го. Поскольку введение в информативную систему прочих признаков, обозначаемых как p'_6, p'_{332} и p''_5, p''_{332} , ухудшает получаемую ошибку классификации, они исключены из дальнейших расчетов.

На последнем этапе выполнялась классификация территории путем ее ранжирования по мере сходства с объектами 1-й и 2-й обучающей выборок. Использовались детерминистские решающие правила; процедура выполнялась в пространстве признаков, вошедших в информативные наборы.

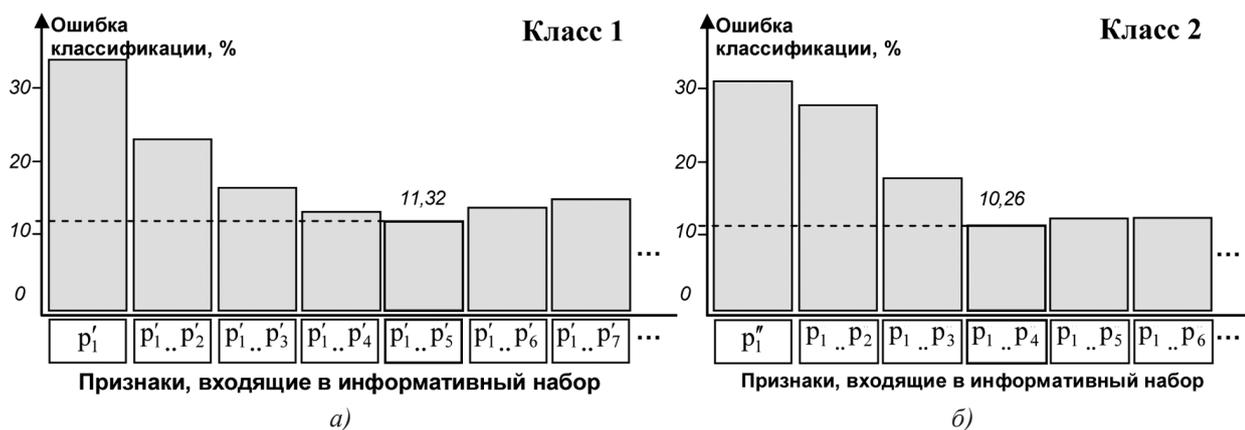


Рис. 5. Ошибки классификации объектов 1-ой (а) и 2-ой (б) обучающих выборок при использовании наборов признаков различной размерности

В результате получены две карты, отражающие меру сходства территории с объектами 1-й и 2-й обучающей выборки. Зоны низких значений на картах соответствуют участкам максимальной перспективности на обнаружение нефтегазовых залежей. Объединенные контуры таких зон показаны на рис. 4. В таблице приведены оценки ошибок 1-го и 2-го рода, полученные отдельно для зон каждого целевого класса и для объединенных зон.

Таблица. Ошибки прогноза

Класс	Ошибка 1-го рода, %	Ошибка 2-го рода, %
1	25,0	10,0
2	37,5	5,00
1+2	12,5	15,0

Обсуждение результатов

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности использования снимков MODIS в тепловом диапазоне спектра для прогнозирования углеводородных объектов. В частности, выявлена приуроченность минимальных значений дисперсии разброса многомерных векторов, составленных значениями разновременных тепловых снимков, к скважинам с установленной нефтегазоносностью фундамента. Эксперименты показали, что введение в информативный набор признаков температурных характеристик снижает ошибку классификации на 2,5%.

Кроме того, показана перспективность использования методов линеamentного анализа геофизических и космических материалов. Подтверждено, что зоны повышенной плотности линеamentов тяготеют к известным залежам углеводородов в фундаменте.

Материалы обработки тепловых снимков и линеamentов, наряду с другими наземными и космическими данными, использованы для прогнозирования новых нефтегазовых объектов методом классификации с обучением, в результате чего выделен ряд перспективных зон. Достоверность результатов подтверждается фактом попадания в перспективные

зоны как объектов обучающих, так и контрольной выборки (семь из восьми объектов). Достаточно высокое значение ошибки 1-го рода для класса 2 вызвано рядом методических факторов, обусловленных малыми объемами эталонных выборок: во-первых, контрольная выборка не подразделялась на две отдельные подвыборки, как это было сделано для обучающей; во-вторых, по той же причине в состав контрольной выборки вошли объекты, нарушавшие компактность обучающих выборок, а, следовательно, заведомо нетипичные.

Отдельно следует отметить закономерное расположением выделенных зон по отношению к известным нефтегазовым месторождениям, большинство из которых располагается в надфундаментной толще. Это является косвенным подтверждением гипотезы об образовании залежей углеводородов в фундаменте путём их миграции из осадочного чехла.

Выводы

В работе рассмотрены три подхода к прогнозированию углеводородных залежей: 1) на основе анализа тепловых снимков; 2) методами линеаментного анализа физических полей и рельефа; 3) путем многомерной классификации разнородных и разноуровневых геоданных. Наиболее целесообразным представляется комбинирование всех трех подходов, когда материалы анализа тепловых снимков и линеаментов используются в качестве дополнительных признаков в процедурах классификации. Построенная в результате прогнозная карта позволяет оконтурить участки, перспективные на обнаружение новых углеводородных залежей, приуроченных к кристаллическому фундаменту. Таким образом, результаты исследований могут использоваться как основа при постановке дальнейших исследований, выполняемых геологическими и геофизическими организациями в пределах Северного склона ДДВ.

Важной особенностью технологии, элементы которой представлены в статье, является использование при прогнозировании глубокозалегающих углеводородных залежей материалов сравнительно недорогих геофизических и космических съемок, что особенно важно при проведении экспресс-оценки значительных территорий.

Литература

1. Пивняк Г.Г., Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. ГИС-технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных // Доклады НАН Украины. 2007. № 6. С. 121–128.
2. Чебаненко И.И. Новые гипотезы и новые перспективы поисков нефтяных и газовых месторождений // Геол. журн. 1981. № 41. № 2. С. 10–20.
3. Шустер В.Л., Левянт В.Б., Элланский М.М. Нефтегазоносность фундамента: проблемы поиска и разведки месторождений углеводородов. М: Техника, 2003. 175 с.
4. Busygin B.S., Nikulin S.L., Zatsepin E.P., Garkusha I.N. The methodology of operative prognosis of hydrocarbons by gravity-magnetic and space data // Геофизический журнал. 2010. Т. 32. No. 4. P. 26–28.

5. *Pivnyak G., Busygin B., Nikulin S.* Geoinformation system RAPID as the means of solving the problems of environment and nature management // 12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production. 2010. Prague, Czech Republic. P. 423–430.

**Prediction of hydrocarbon accumulations within basement
of the Pripyat-Dniepr-Donets aulacogen using complex
of geophysical and space data**

B.S. Busygin, S.L. Nikulin, I.N. Garkusha

*National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine
E-mail: busyginb@yandex.ru*

The paper provides the technology elements and some of the results of hydrocarbon accumulations prediction within the basement of the northern slope of the Pripyat-Dniepr-Donets aulacogen. The association of hydrocarbon deposits with areas of increased density of lineaments of gravitational field and digital elevation model created by SRTM satellite image is established. The expediency of use, besides traditional geological and geophysical materials, the results of satellite imagery in the thermal channel of the spectrum is shown. Prediction map showing the location of the most promising sites for new oil and gas deposits discovering is built.

Keywords: Pripyat-Dniepr-Donets aulacogen, hydrocarbon accumulations, computer prediction, lineaments, thermal satellite images, remote sensing, geological and geophysical data.