

Геоинформационная технология прогноза скоплений метана в пределах шахтных полей Центрального Донбасса

Б.С. Бусыгин, С.Л. Никулин, В.К. Свистун

*Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,
49005, Украина, Днепрпетровск, пр. К. Маркса, 19,
e-mail: busyginb@yandex.ru*

Представлена компьютерная технология прогноза скоплений метана на угольных месторождениях путём интегрированного анализа наземных, скважинных и космических данных. Описаны результаты прогноза перспективных зон в пределах крупного шахтного поля на территории Донецкого угольного бассейна (Украина).

Ключевые слова: геоинформационная система и технология, скопления метана, шахтное поле, геофизические и спутниковые данные, линеаменты, Донецкий угольный бассейн.

Введение

Добыча метана из пластов угольных месторождений является перспективным направлением получения экологически чистых и эффективных энергоресурсов, попутно решая важную задачу повышения безопасности шахт. По различным оценкам, в пределах Донецкого угольного бассейна запасы угольного метана составляют 8...13 трлн м³. При этом ежегодно из недр выделяется до 4 млрд м³ метана, а добыча не превышает 8 % от этого количества. Поэтому вопрос прогноза скоплений метана шахтных полей стоит весьма остро.

Традиционные методы поиска скоплений метана базируются на непосредственном изучении вещества и свойств пород, что предполагает значительные затраты времени и средств. В силу этого в настоящее время большое внимание уделяется развитию методов и технологий, использующих сравнительно недорогие наземные геофизические методы и космические съемки и позволяющих выполнять оперативный прогноз залежей метана.

В статье предложена геоинформационная технология прогноза участков аномального скопления метана. Технология обеспечивает интегрированный анализ разнородных и разноразноуровневых данных и базируется на методах распознавания образов, обработки изображений и линеаментного анализа (Пивняк и др., 2007, Busygin, Nikulin, 2009).

Характеристика участка

Исследуемая территория размером 9,1×7,0 км располагается на территории Донецкого угольного бассейна между городами Донецк и Ясиноватая и охватывает шахтное поле действующей шахты им. Засядько. Участок представляет собой холмистую равнину с перепадом высот от 155 до 272 м над уровнем моря; около 10 % территории занято горнопромышленными сооружениями.

В геологическом строении участка принимают участие отложения среднего карбона свит C₂⁵, C₂⁶ и C₂⁷, представленные различными по мощности слоями песчаников, алевролитов и аргиллитов, вмещающих маломощные пласты известняков и углей.

В центральной и восточной частях участка широко развиты складчатые и разрывные нарушения субмеридионального и субширотного направления. Тектоническое строение очень сложное и характеризуется большим количеством разрывных нарушений с амплитудами 20...50 м. Простираение угленосной толщи близко к субширотному, с падением на северо-запад под углами 3...18°. В зонах флексурных складок углы падения достигают 60°. В на-

стоящее время разрабатываются склонные к самовозгоранию пласты M_3 и L_4 , залегающие на глубинах до 1200 м.

Свободный метан преимущественно концентрируется в локальных положительных складках слоёв песчаников, перекрытых слабопроницаемыми известняками и аргиллитами. Отмечается приуроченность скоплений метана к разрывным нарушениям, фиксируемым наземными геофизическими методами. Наиболее перспективным считается пласт песчаников $m_4^0 S_4^1$, находящийся в интервале между угольным пластом M_3 и слоем известняков M_3 .

Данные

Предлагаемая геоинформационная технология прогноза скоплений метана позволяет обрабатывать и анализировать разнотипные данные (геологические, геофизические, геохимические, ландшафтные), полученные из различных источников (скважинных, наземных, космических).

При выполнении прогноза на изучаемом шахтном поле использовались:

- геологические карты и схемы масштаба 1:25 000;
- площадные съемки гравитационного поля масштаба 1:25 000 (покрывают весь исследуемый участок) и 1:10 000 (покрывают часть территории);
- модель рельефа, построенная по данным космической радарной съемки SRTM (Werner, 2001);
- данные о газоносности 149 скважин, расположенных в пределах шахтного поля;
- карты, отражающие геолого-физические свойства песчаника $m_4^0 S_4^1$, построенные по результатам измерений в скважинах (мощность слоя, коэффициент пористости и др.);
- карты кровли и почвы угольных пластов M_3 и L_4 и песчаников $m_4^0 S_4^1$ и $n_1^0 S_4^1$.

Ранее проведенные исследования (Гончаренко и др., 2007) показали, что благоприятными факторами для поисков потенциальных скоплений метана являются локальные поднятия на горизонте пласта M_3 , локальные минимумы гравитационного поля, повышенные значения коэффициента относительной мощности песчаника $m_4^0 S_4^1$, общей мощности песчаника $m_4^0 S_4^1$ и коэффициента пористости песчаника $m_4^0 S_4^1$.

Технология и результаты исследований

В основе технологии лежит специализированная геоинформационная система РАПИД (Пивняк, 2007), позволяющая выполнять прогноз разнообразных объектов и явлений по комплексу прямых и косвенных признаков. Ключевую роль при решении прогнозных задач играют методы обработки изображений, линеаментного анализа и распознавания образов (Бусыгин, 1991). Схема технологии приведена на рис. 1.

Предварительная обработка данных. Все материалы предварительно привязываются географически и оцифровываются. Векторные данные группируются в отдельные векторные тематические слои, а сеточные и растровые подвергаются необходимым коррекциям и приводятся к единой сети.

Расчёт трансформаций и формирование признакового пространства. Как показали проведенные исследования, информативность исходных признаков (гравитационное поле, модель рельефа, характеристики угольного пласта M_3 и слоя песчаников $m_4^0 S_4^1$) недостаточна для достижения высокого качества результатов прогноза. В связи с этим выполняется расчёт разнообразных трансформаций, позволяющих подчеркнуть те или иные аспекты изучаемого явления и зачастую обладающие большей информативностью по сравнению с

исходными данными. ГИС РАПИД позволяет выполнять более 200 трансформаций, в том числе дифференциальные, текстурные, гистограммные, морфологические, корреляционные, фрактальные, а также разнообразные характеристики сети линеаментов, отражающие структурно-тектоническую обстановку на участке (Pivnyak et al., 2010).

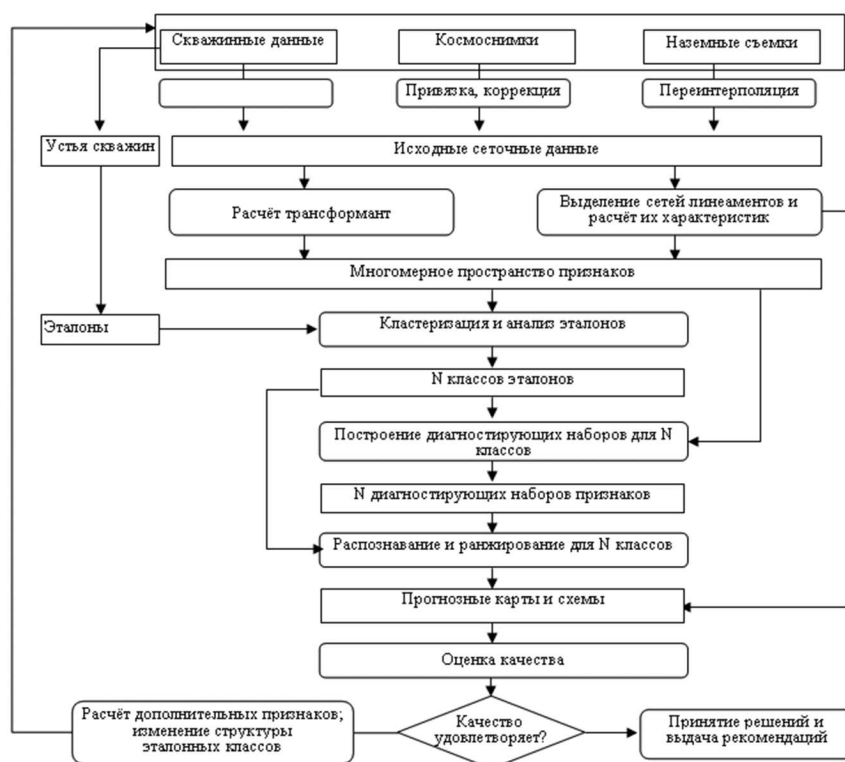


Рис. 1. Схема технологии прогноза залежей метана

Линеаментный анализ. Линеаменты выделяются на геофизических картах, моделях рельефа и космических снимках. Большинство из них связано с различными тектоническими нарушениями земной коры. Поскольку до 70 % метановых залежей Донецкого бассейна приурочено к разломным структурам, линеаментный анализ играет важную роль при прогнозе перспективных участков. Выделение линеаментов проводится экспертом-геологом в интерактивном режиме, с использованием ряда специальных методик визуализации анализируемых карт. Линеаменты, выделенные по отдельным геоизображениям, объединяются и служат основой для расчёта специальных характеристик линеаментной сети (Pivnyak et al., 2010).

Формирование и коррекция эталонных выборок. Технология широко использует методы распознавания и ранжирования с эталонами — точками или элементарными участками территории, в которых достоверно установлен характер проявления прогнозируемого явления. В описываемом случае ими являются устья скважин. Эталоны представляются участком размером 3×3 точки сети, центральная из которых совпадает с устьем. Скважины с выявленной газоносностью формируют «перспективный» эталонный класс, а прочие — «бесперспективный».

Далее путём выполнения операции многомерного шкалирования (Borg, Groenen, 2005, Бусыгин, Зацепин, 2006) анализируется компактность расположения эталонных объектов в многомерном пространстве, сформированном исходными наборами данных и их трансформантами. В случае если множество объектов распадается на несколько изолированных кластеров, происходит разделение эталонного класса на несколько классов, каждый из которых в дальнейшем обрабатывается отдельно (Бусыгин, Зацепин, 2006).

Минимизация признакового пространства. Для снижения ошибки прогноза рассчитанный набор признаков оптимизируется, т. е. путём применения метода последовательного присоединения определяется диагностирующий набор признаков (Бусыгин, Мирошниченко,

ко, 1991), при котором достигается минимальная ошибка классификации. Диагностирующие наборы рассчитываются отдельно для каждого класса эталонных объектов. Признаки, не вошедшие в наборы, из дальнейших расчётов исключаются.

Прогнозирование и оценка качества. Прогнозирование выполняется в многомерном пространстве признаков, вошедших в диагностирующий набор, и сводится к выполнению двух основных процедур — распознаванию, при котором каждая точка территории относится к одному из эталонных классов, и ранжированию, заключающемуся в оценке некоторой меры сходства территории с одним из эталонных классов в многомерном пространстве признаков. Карты меры сходства отражают перспективность территории с точки зрения наличия аномальных скоплений метана и позволяют выделить участки, рекомендуемые для дальнейшего изучения.

Необходимым этапом является *оценка качества полученных результатов*. Для этого выделенные анализируются попадание «перспективных» и «бесперспективных» эталонов в выделенные участки. Чем больший процент «перспективных» эталонов и меньший — «бесперспективных» — попадает внутрь участков, тем выше качество прогноза.

Использование технологии на шахтном поле шахты им. Засядько

В качестве исходных признаков (рис. 2) для распознавания и ранжирования использовались следующие материалы, приведенные к регулярной сети 20×20 м:

- F1 — гравитационное поле V_z масштаба 1: 25 000;
- F2 — амплитуда локальных структур угольного пласта M_3 ;
- F3 — мощность песчаника $m_4^0 S_4^1$;
- F4 — значения коэффициента пористости песчаника $m_4^0 S_4^1$;
- F5 — коэффициент относительной мощности песчаника $m_4^0 S_4^1$;
- F6 — суммарная мощность песчаников в пределах интервала;
- F7 — значения высот рельефа дневной поверхности, полученные из снимка SRTM.
- F8–F11 — изогипсы почвы угольных пластов M_3 и L_4 и кровли песчаников m_4 и n_1 .

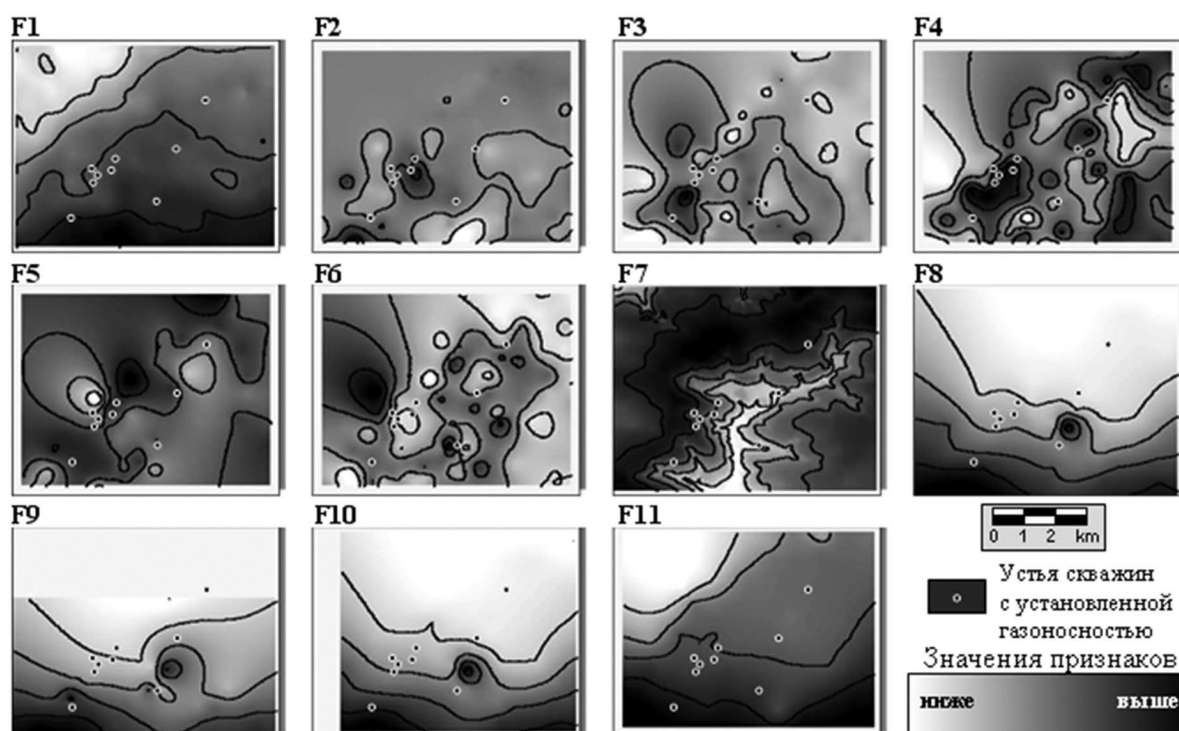


Рис. 2. Карты исходных признаков F1–F11

Далее были рассчитаны более 400 трансформант-дифференциальных, интегральных, гистограммных, корреляционных и других (Бусыгин, Мирошниченко, 1991). Отдельно рассчитывались признаки-характеристики линеamentной сети территории участка.

Предварительно в интерактивном режиме выделялись линеamentы гравитационного поля (масштабов 1:25 000 и 1:10 000) и рельефа. Следует отметить, что линеamentы рельефа и гравитационного поля тесно связаны между собой, частично совпадая и образуя единую сеть с четырьмя преобладающими направлениями — 0, 45, 90 и 135°. При этом линеamentы рельефа отражают, в первую очередь, неоднородности, проявленные в приповерхностных слоях, тогда как в гравитационном поле отображаются более глубокие объекты. Результаты приведены на рис. 3. Для объединённой сети линеamentов вычислялись различные характеристики в скользящих окнах размерами 7×7 точек сети (140×140 м), 15×15 (300×300 м) и 20×20 (400×400 м), в том числе, суммарная длина на единицу площади (плотность), преобладающий азимут, коэффициент анизотропии и ряд других (рис. 4).

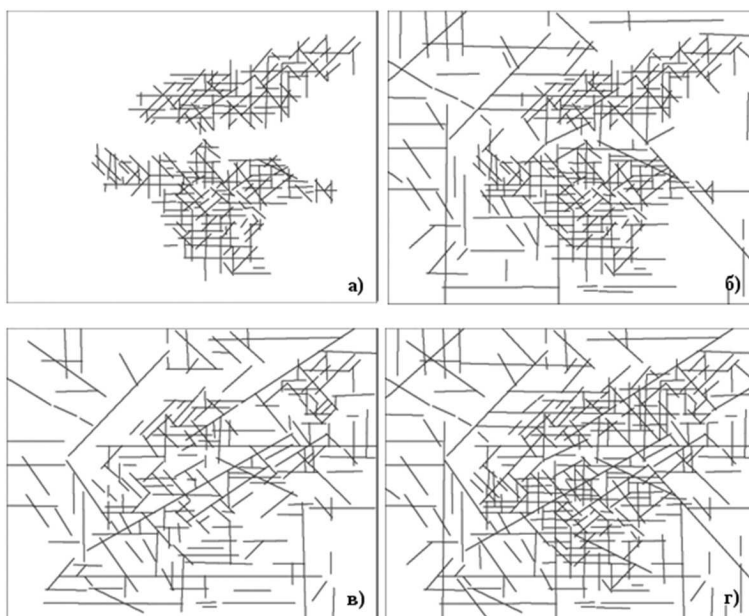


Рис. 3. Линеamentы, выделенные по картам гравитационного поля:
 а — масштаб 1:10 000; б — масштаб 1:25 000;
 в — цифровая модель рельефа; г — результат наложения

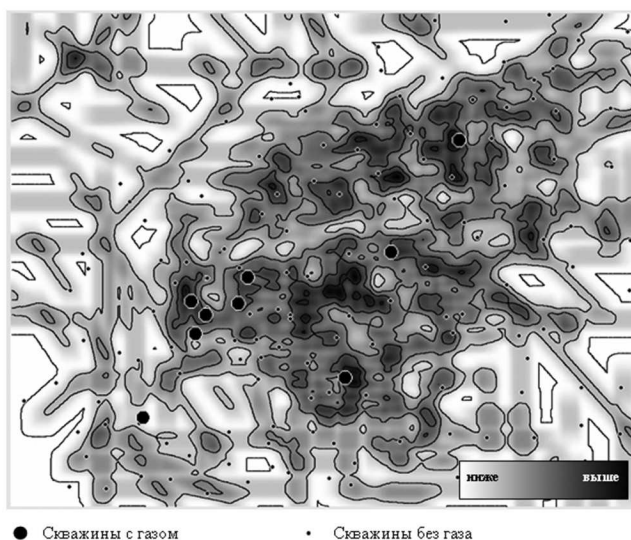


Рис. 4. Карта плотности линеamentов гравитационного поля и ЦМР
 (суммарная длина линеamentов внутри окна размером 300×300 м)

На следующем этапе создавались и анализировались эталонные выборки. За период с 1958 по середину 2000-х гг. на территории изучаемого шахтного поля пробурено более ста скважин, достигающих глубины 1500 м. В девяти из них зафиксирована повышенная газоносность. Узлы сети над этими скважинами сформировали первый класс эталонов, называемый перспективным. Применение метода многомерного шкалирования, отображающего многомерную информацию в трехмерном пространстве, позволило выделить среди девяти газоносных скважин три изолированные группы. В связи с этим эталонный класс был разбит на три класса: А, состоящий из четырех скважин, В (три скважины) и С (две скважины). Устье каждой газоносной скважины аппроксимировалось участком сети размером 3×3 точки; таким образом, класс А состоял из 36 объектов — узлов сети, класс В — из 27-ми, а С — из 18 объектов. 140 скважин, в которых не было обнаружено повышенное содержание метана, составили класс D (рис. 5).

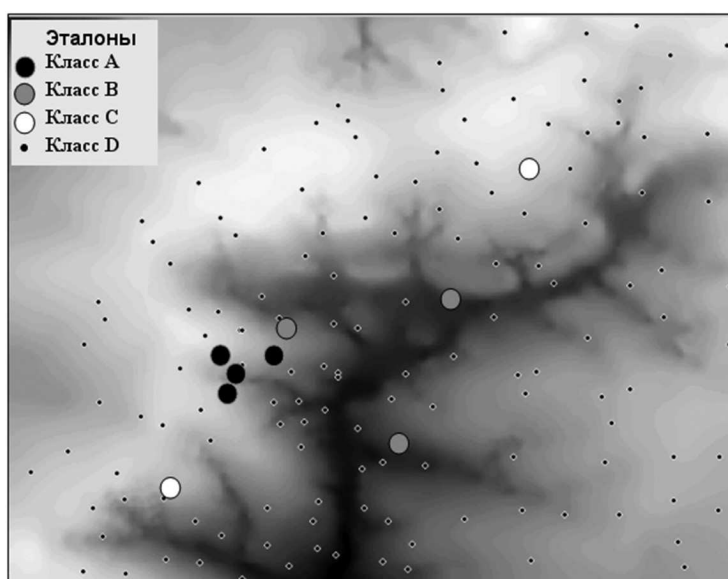


Рис. 5. Схема расположения эталонных объектов (наложена на цифровую модель рельефа)

Для классов А, В и С методом последовательного присоединения были построены три диагностирующих набора признаков, обеспечивающих минимальные ошибки классификации.

Диагностирующий набор для класса А составили пять признаков: коэффициент относительной мощности песчаника $m_4^0S_4^1$ (F5); ранговый коэффициент корреляции Кендалла между гравитационным полем и мощностью песчаника $m_4^0S_4^1$; сумма абсолютных значений $|A_{ij}|$ из верхнего треугольника матрицы, сформированного ковариациями пар признаков F1–F7, $j < i$; гистограммный признак гравитационного поля (Бусыгин, Мирошниченко, 1991); направление горизонтального градиента коэффициента пористости песчаника $m_4^0S_4^1$ в скользящем окне 160×160 м. Ошибка классификации набора составила 5,56 %.

В диагностирующий набор для класса В вошли также пять признаков: значения высот рельефа дневной поверхности (F7); интегральная характеристика рельефа; ранговый коэффициент корреляции Кендалла между гравитационным полем и мощностью песчаника $m_4^0S_4^1$; характеристика, отражающая параметр гистограммы значений гравитационного поля (Бусыгин, Мирошниченко, 1991); суммарная длина линейных элементов гравитационного поля и рельефа в скользящем окне размером 300×300 м. Ошибка классификации набора составила 9,35 %.

В диагностирующий набор для класса С вошли семь признаков: мощность песчаника $m_4^0S_4^1$ (F3); текстурная характеристика гравитационного поля, отражающая инверсный момент разности (Nagalick, 1979) в скользящем окне 460×460 м; характеристика, отражающая параметр гистограммы значений гравитационного поля (Бусыгин, Мирошниченко, 1991); направление горизонтального градиента амплитуды локальных структур угольного пласта

M_3 в скользящем окне 140×140 м; направление горизонтального градиента коэффициента пористости песчаника $m_4^0 S_4^1$ в скользящем окне 160×160 м; суммарная длина линеаментов гравитационного поля и рельефа в скользящем окне размером 400×400 м; суммарная длина линеаментов гравитационного поля в скользящем окне размером 400×400 м. Ошибка классификации набора составила 6,72 %.

Признаки, вошедшие в диагностирующие наборы, использовались для выполнения процедуры ранжирования. В результате были построены карты, отражающие меру сходства территории с объектами классов А, В и С. Зоны с максимальными значениями мер сходства являются наиболее перспективными с точки зрения обнаружения аномальных скоплений метана (рис. 6). О достоверности полученных результатов свидетельствует тот факт, что все объекты классов А, В, С попали внутрь зон с максимальными значениями сходства, в то время как подавляющее большинство объектов класса D находятся вне их пределов.

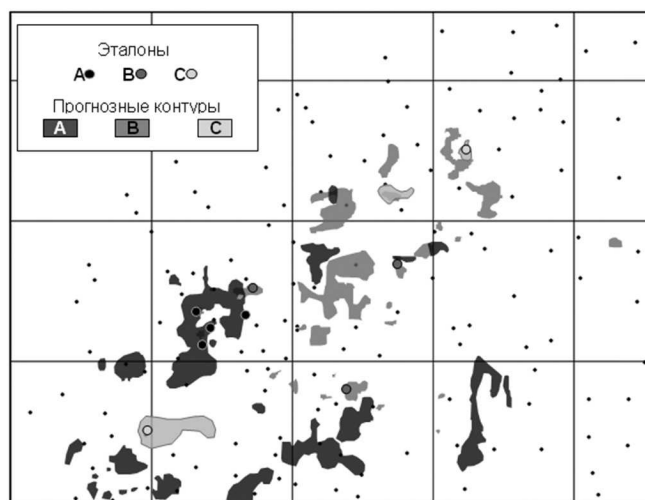


Рис. 6. Участки, перспективные на обнаружение залежей метана

Выводы

- Применение технологии на территории Центрального Донбасса позволило получить прогнозные карты и выделить зоны, перспективные на обнаружение скоплений метана. Результаты хорошо согласуются с известными геологическими фактами и подтверждаются материалами бурения скважин.
- Особый интерес вызывают результаты линеаментного анализа. Как видно на рис. 3, большинство (восемь из девяти) скважин с зафиксированной газоносностью приурочены к зонам повышенной концентрации линеаментов и, соответственно, трещиноватости толщи. Это, по всей видимости, связано с тем, что такие разуплотненные зоны помимо того, что обладают повышенными коллекторными свойствами, служат каналами миграции газов. Другим фактором является разрядка современных тектонических напряжений, происходящая по древней линеаментной сети, и ведущая к возрастанию микротрещиноватости пород и высвобождению связанного газа.

Следовательно, повышенная концентрация линеаментов может считаться поисковым признаком при прогнозировании скоплений метана угольных бассейнов. В первую очередь, интерес представляют линеаменты гравитационного поля, не подверженного техногенным изменениям и в большей степени отражающего глубинные объекты и процессы по сравнению с цифровыми моделями рельефа и космическими снимками.

- Проведенные исследования продемонстрировали целесообразность использования данных, полученных в результате сравнительно недорогих геофизических исследо-

ваний и радарных спутниковых съемок. Из 17 признаков, вошедших в диагностирующие наборы для классов А, В, С, трансформантами гравитационного поля или рельефа являются 11.

Вычислительные эксперименты показали, что привлечение к прогнозированию, помимо геологических данных, результатов гравитационной съемки, позволяет снизить ошибку классификации на 30...50 %. В случае же, если дополнительно используются и спутниковые данные, ошибка классификации снижается ещё на 5...15 %.

Таким образом, можно с уверенностью говорить о важности и целесообразности комплексирования геологических, геофизических и спутниковых съемок для обнаружения скоплений метана в условиях Центрального Донбасса, что позволит повысить достоверность прогноза без существенного роста материальных затрат.

Литература

1. *Бусыгин Б.С., Зацепин Е.П.* Кластеризация объектов на основе применения метода триангуляции // *Научный вестник НГУ.* 2006. № 3. С. 70–75.
2. *Бусыгин Б.С., Мирошниченко Л.В.* Распознавание образов при геолого-геофизическом прогнозировании. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. 168 с.
3. *Гончаренко В.А., Свистун В.К., Герасименко Т.В., Малиновский А.К.* Перспективы комплексного геолого-геофизического прогноза зон скопления метана на угольных месторождениях Донбасса // *Научный вестн. НГУ.* 2007. № 4. С. 73–77.
4. *Пивняк Г.Г., Бусыгин Б.С., Никулин С.Л.* ГИС-технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных // *Докл. НАН Украины.* 2007. № 6. С. 121–128.
5. *Borg I., Groenen P.* Modern Multidimensional Scaling: theory and applications. 2nd ed. Springer-Verlag. 2005. 614 p.
6. *Busygin B., Nikulin S.* The methodology of oil and gas deposits prognosis by space and geophysical data // *Proc. 71st European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition.* Amsterdam, Netherlands. 2009. V. 1. P. 858–862.
7. *Haralick R.M.* Statistical and Structural Approaches to Texture // *Proc. IEEE.* 1979. V. 67. 786-804.
8. *Pivnyak G., Busygin B., Nikulin S.* Geoinformation System RAPID as the Means of Solving the Problems of Environment and Nature Management // *Proc. 12th Intern. Symp. Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010.* May 24–26, 2010, Prague. Czech Republic. 2010.
9. *Werner M.* Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): Mission overview // *J. Telecom (Frequenz).* 2001. V. 55. P. 75–79.

Geoinformation technology for forecasting methane accumulations within the donetsk basin mine fields

B.S. Busygin, S.L. Nikulin, V.K. Svistun

*State higher educational institution “National Mining University”,
49005, Ukraine, Dnipropetrovs’k, K Marx av., 19,
e-mail: busyginb@yandex.ru*

The computer technology of methane accumulations forecasting from coal deposits based on integrated analysis of ground-based, borehole and space data is presented. The results of forecasting of the perspective zones within the Donetsk Coal Basin (Ukraine) coal deposit are described.

Keywords: computer technology, geoinformation system, methane accumulations, coal fields, geophysical and satellite data, lineaments, Donetsk Coal Basin.