

# Техніка і технології

УДК 620.179

## МЕТОДИЧНЕ І ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ГЕДИНАМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ В ЗОНІ ПРОЛЯГАННЯ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

<sup>1</sup>А.В. Яворський, <sup>2</sup>Айфа Тахар, <sup>1</sup>П.М. Райтер, <sup>1</sup>І.В. Рибіцький, <sup>1</sup>С.П. Ващишак

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (0342) 504708,  
e-mail: andryuus1978@gmail.com

<sup>2</sup>Науково-дослідна лабораторія геолого-геофізичних досліджень (CNRS UMR6118)  
при університеті Рен 1 (Рен, Франція), e-mail: tahar.aifa@univ-rennes1.fr

Розглядаються питання підвищення надійності експлуатації протяжних інженерних споруд шляхом використання мобільних та стаціонарних систем прогнозування геодинамічної небезпеки. Проведено аналіз основних геодинамічних чинників, які суттєво впливають на експлуатаційні характеристики підземних магістральних нафтогазопроводів, а також підходів, що використовуються для отримання інформації про стан геодинамічної зони, яку перетинає інженерна споруда. Запропоновано нове комплексне рішення проблеми прогнозування геодинамічної небезпеки в зоні пролягання протяжних інженерних споруд, що полягає в проведенні обстежень у певній послідовності. Подано основні результати, отримані в ході експериментальних досліджень на реальних об'єктах із використанням запропонованих систем. Розроблено конструкцію та алгоритм роботи стаціонарної та мобільної систем прогнозування геодинамічної небезпеки в зоні пролягання магістральних газопроводів, а також подано методику проведення вимірювання за допомогою даних систем. З метою зменшення впливу суб'єктивного фактору на результати прогнозування геодинамічної небезпеки запропоновано новий сучасний метод розрахунку ймовірності настання негативної геодинамічної події, що базується на використанні сучасних нейромережових методів оброблення результатів багатопараметрових вимірювань та дозволяє оцінити геодинамічний ризик у зоні пролягання трубопроводів.

Ключові слова: нафтогазопроводи, геологічні розломи, геодинамічна зона, механічні напруження, нейромережа, геодинамічний ризик.

Рассматриваются вопросы повышения надежности эксплуатации протяженных инженерных сооружений путем использования мобильных и стационарных систем прогнозирования геодинамической опасности. Проведен анализ основных геодинамических факторов, которые существенно влияют на эксплуатационные характеристики подземных магистральных нефтегазопроводов, а также подходов, используемых для получения информации о состоянии геодинамической зоны, которую пересекает инженерное сооружение. Предложено новое комплексное решение проблемы прогнозирования геодинамической опасности в зоне пролегания протяженных инженерных сооружений, которое базируется на проведении обследований в определенной последовательности. Представлены основные результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований на реальных объектах с использованием предложенных систем. Разработана конструкция и алгоритм работы стационарной и мобильной систем прогнозирования геодинамической опасности в зоне пролегания магистральных газопроводов, а также представлена методика проведения измерений с помощью данных систем. С целью уменьшения влияния субъективного фактора на результаты прогнозирования геодинамической опасности предложен новый современный метод расчета вероятности наступления негативного геодинамического события, базирующийся на использовании современных нейросетевых методов обработки результатов многопараметровых измерений и позволяет оценить геодинамический риск в зоне пролегания трубопроводов.

Ключевые слова: нефтегазопроводы, геологические разломы, геодинамическая зона, механические напряжения, нейросеть, геодинамический риск.

Questions of increasing the reliability of engineering structures by using mobile and fixed systems of predicting geodynamic risk have been considered. We've conducted the analysis of the main geodynamic factors that significantly affect the performance of underground oil and gas pipelines, as well as the approaches used for obtaining the information on the state of geodynamic zone that are crossed by the engineering construction. A new integrated problem solution of predicting the geodynamic danger in the zone of extensive engineering structures

*running has been suggested; this solution is based on conducting surveys in the right sequence. The main results obtained in the course of experiments at the actual facilities by using the suggested system have been given in this article. The design and the algorithm of the operation of fixed and mobile systems for predicting geodynamic hazard in the zone of gas pipelines running, as well as the technique of measuring with the help these systems have been developed. For the purpose of reducing the influence of the subjective factor on the results of predicating geodynamic hazard a new modern method of calculating the probability of negative geodynamic events, occurrence has been suggested; this method is based on using modern neural network methods of processing the results multi-parameter measurements and it allows evaluating the geodynamic risk in zone of pipelines running.*

Keywords: oil and gas pipeline, geological fault, geodynamic zone, mechanical stresses, neural network, geodynamic risk.

### Вступ

Проблема забезпечення надійної і довготривалої механічної стійкості протяжних інженерних споруд все частіше розглядається в напрямку оцінки і прогнозування процесів, які проходять у земній корі. Однак, якщо ризик руйнування об'єктів потужними впливами типу великих землетрусів чи зсувів очевидний і доволі детально досліджений, то механізм втрати механічної стійкості ґрунтових порід під впливом відносно слабких градієнтів геофізичних полів до цього часу не з'ясований.

Нафтогазопроводи як лінійні системи значної протяжності перетинають на своєму шляху зони з геологічними умовами, що значно відрізняються за властивостями, в тому числі геологічні дискретні – розломи, складки, зони розтріскування, тріщини. Тому нафтогазопроводи більш чутливі до впливу деформованого ґрунту, ніж інші споруди великої протяжності (автомобільні дороги), які легко відновити [1, 2]. Аварії на нафтогазопроводах можуть стати причиною величезного матеріального збитку і катастрофічних забруднень навколишнього середовища.

Блокова будова земної кори і її дискретні зумовлюють формування над границями блоків, тріщинами і розломами прихованих елементів гірського масиву, який називається геодинамічними зонами (ГДЗ). На поверхні геодинамічні зони, перетинаючись, утворюють вторинні блоки, розміри яких становлять від 1 до 35 км, а форма може бути найрізноманітнішою.

Геодинамічні блоки перебувають в безперервному русі під дією різноманітних сил, в тому числі зумовлених орбітальним і осьовим обертанням Землі. При переміщенні блоків у ГДЗ виникають ділянки з підвищеними механічними напруженнями від деформацій різного знаку і характеру – розтяг, стиск, зсув. У ГДЗ при цьому значно змінюється склад газової фази ґрунтів, оскільки висока проникність зон розломів забезпечує можливість інтенсивного переміщення по вертикалі агресивних газів і рідин із ґрунтових порід.

Збільшення рівня напружень і вмісту агресивних речовин у ГДЗ призводить до активізації підземної корозії, стрес-корозії, росту тріщин і, як наслідок, до зростання кількості відомов підземних нафтогазопроводів та імовірності виникнення аварійних ситуацій.

Ще одним з геодинамічних чинників, який суттєво впливає на експлуатаційні характеристики підземних магістральних нафтогазопроводів, є перетин ними численних систем «яр-

балка». Вздовж цих структур спостерігається різке посилення таких геодинамічних процесів, як ерозія та денудація, а в окремих випадках суфозні просідання і гравітаційні явища – зсуви. При перетині ерозійних форм рельєфу нафтогазопроводами в них утворюються вигини (згини), зокрема, у вертикальній площині на коротких відстанях. При підсиленні геодинамічних напружень і зовнішніх впливів на таких ділянках можуть локально зростати навантаження, стимулюючи порушення герметичності та цілісності трубопроводу (рис. 1).

Отже, створення системи раннього попередження на аварійно-небезпечних ділянках пролягання нафтогазопроводів з метою управління геодинамічними ризиками є актуальним завданням.

### Передумови проблеми та постановка задачі дослідження

На даний час оцінка геодинамічної небезпеки для протяжних інженерних споруд здійснюється не комплексно, а окремо від оцінки стану навколишнього середовища. За останнє десятиліття основні сили дослідників у галузі оцінки і прогнозування геодинамічної небезпеки зосереджені, в основному, на методах аналізу аерокосмічних зображень і дистанційному супутниковому зондуванні території якими пролягають протяжні інженерні споруди [3, 4, 5]. На нашу думку, такий підхід може бути застосований на початковому етапі дослідження для наближеного визначення потенційних аварійно-небезпечних ділянок за напрямком пролягання протяжних інженерних споруд та в жодному разі не може замінити проведення польових досліджень.

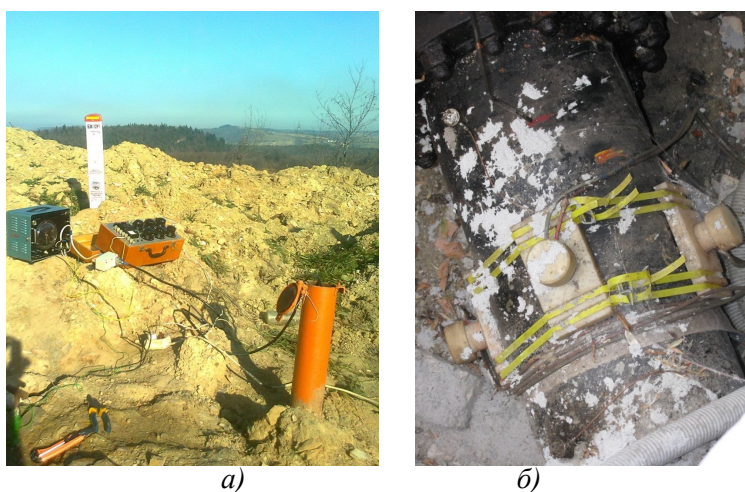
З метою оцінки геодинамічної небезпеки для нафтогазопроводів на зсувонебезпечних ділянках встановлюються пости контролю тільки для оцінки напружено-деформованого стану (НДС) труби (рис. 2).

Про активність зсуву можна судити тільки за значенням НДС ділянки трубопроводу, але цієї інформації недостатньо у разі протидії такому геодинамічному процесу на стадії розвитку – потрібно знати стан ґрунтового масиву, який оточує трубопровід у зоні з активною геодинамікою [2].

Основні теоретичні та методичні положення організації систем контролю і моніторингу природного середовища та літосфери докладно розглянуті в роботах російських вчених Trofimov V.T., Yepishin V.K., Korolev V.A., Izrael Y.A., і Gamburtseva A.G.[6]. Однак при їх прак-



**Рисунок 1 – Приклади руйнувань трубопроводів, пов'язані з впливом геодинамічного фактора**



*а) Тензометричний пост - газопровід Пасічна-Долина;  
б) Магнітодинамічний пост - аміакопровід Тольяті-Одеса*

**Рисунок 2 – Пости контролю напружено-деформованого стану трубопроводів на ділянках із високою зсувною активністю**

тичному застосуванні виникає серйозна проблема, пов'язана з необхідністю виділення малих геодинамічних варіацій локальних ділянок геологічного середовища при реєстрації та обробці сигналів полів різної фізичної природи, також необхідним є розроблення геоелектричних моделей геодинамічного розвитку об'єктів моніторингу. Крім того, складність і розмаїтість проявів геодинаміки середовищ призводить до необхідності розширення кількості ко-

нтрольованих параметрів геодинамічних об'єктів при моніторингу, що значно збільшує потік вимірювальної інформації. Обробка даної інформації без використання спеціалізованих автоматизованих систем збору та аналізу результатів вимірювань стає практично неможливою.

Для отримання інформації про стан геодинамічної зони, яку перетинає інженерна споруда великої протяжності, існують два підходи.

Перший, більш глобальний, полягає в реалізації комплексу різноманітних методів дослідження властивостей ГДЗ, у його основі лежить загальна оцінка об'єкта (всієї території, якою прокладено інженерні споруди великої протяжності) в певний момент часу. До згаданих методів належать: фотограмметрія, аерофотозйомка в інфрачервоному спектрі, застосування технологій ідентифікації на базі геоінформаційних систем, оцінка гравітаційних і магнітних полів у зонах прогнозованих ГДЗ, визначення рівня ґрунтових вод і зон можливих зсувів.

Недоліками такого підходу є: необхідність забезпечення ідентичності всього комплексу вимірювань щодо загальної площі об'єкта через певний період часу, тривалість якого важко однозначно обґрунтувати; тривалість і висока вартість виконуваних робіт, необхідність залучення значних матеріальних і людських ресурсів, значні обсяги даних вимірювань і складність обробки інформації.

Другий підхід базується на контролі зміни параметрів ГДЗ на локальних ділянках, де існує висока ймовірність непрогнозованої зміни характеристик ГДЗ і обмеження цих ділянок зоною розміщення інженерних споруд великої протяжності. Завдяки цьому значно підвищується вірогідність моніторингу за рахунок виконання автономних вимірів у всіх визначених точках контролю, строго синхронізованих у часі. Синхронізація досягається застосуванням електронних модулів реєстрації в реальному часі і збереження їх значень разом з цільовими вимірюваними параметрами для геодинамічної зони. Ще однією перевагою автономного методу контролю є можливість мінімізувати або виключити вплив сигналів перешкод на процес контролю параметрів у ГДЗ. Основним недоліком методу є необхідність індивідуального зчитування інформації з кожного поста контролю і поповнення енергією джерел живлення автономних пристроїв. Але, враховуючи, що контрольовані процеси порівняно інерційні, а об'єми модулів електроперепрограмованої пам'яті в даний час вельми значні, зазначений недолік усувається шляхом використання сучасної елементної бази і алгоритмів обробки інформації. Проблему автономного живлення, на наш погляд, доцільно вирішувати шляхом переведення вимірювальних модулів у стан мінімального енергоспоживання («засинання») між моментами вимірювань.

#### **Розв'язання поставленої проблеми, отримані результати**

Отже, для розв'язання проблеми прогнозування геодинамічної небезпеки в зоні пролягання протяжних інженерних споруд з метою управління геодинамічними ризиками слід застосувати комплексний підхід. Комплексне вирішення проблеми вбачається у певній послідовності виконання обстежень з метою побудови ефективної системи моніторингу на найбільш аварійно-небезпечних ділянках протяжних інженерних споруд. Таким чином, комплексний підхід є послідовністю наступних дій:

– аерокосмічне обстеження і зондування зони пролягання протяжних інженерних споруд;

– проведення польових експрес-обстежень мобільними пристроями з метою геодинамічного картування у межах зони пролягання протяжних інженерних споруд;

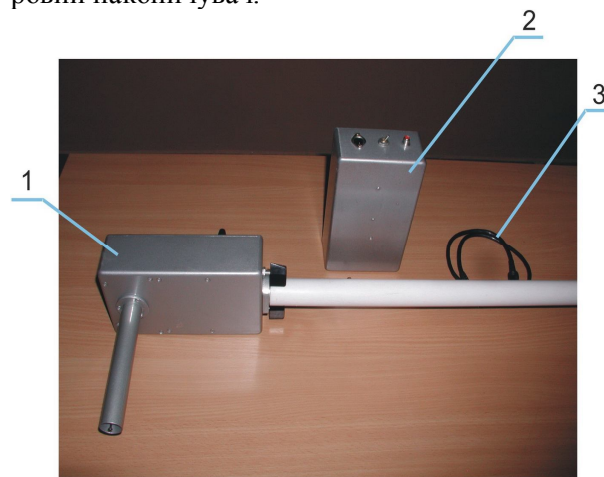
– застосування комплексу геофізичних методів (вертикальне електричне зондування, метод природного електричного поля, метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі, магнітометрія) на виявлених потенційно-небезпечних ділянках траси протяжної інженерної споруди з метою оцінки рівня геодинамічної небезпеки [7];

– встановлення у визначених за результатами попереднього обстеження місцях аварійних постів комплексного контролю і моніторингу геодинамічної небезпеки, як елемент ефективного управління геодинамічними ризиками.

Для локалізації ділянок з високим рівнем геодинамічного ризику вздовж траси пролягання нафтогазопроводів у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу наявні такі новітні апаратні комплекси:

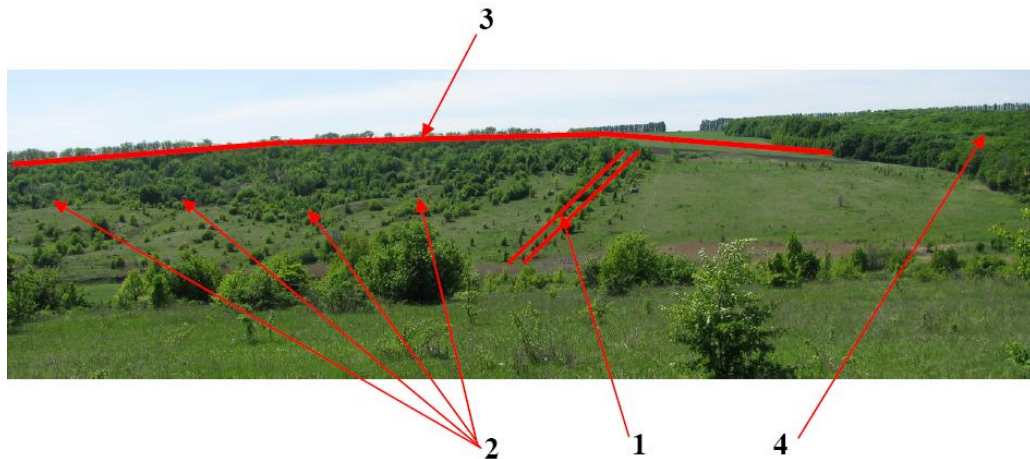
**Мобільна система моніторингу геодинамічної активності в зоні пролягання магістральних нафтогазопроводів «Пошук-1»** [8].

Робота даної мобільної системи базується на принципах електродинамічної інтроскопії приповерхневого шару Землі – вимірюванні зміни постійної та змінної складових геоелектричного поля на висоті до 1 м над поверхнею Землі. Методика досліджень з системою полягає у неперервному скануванні земної поверхні з метою виявлення неоднорідностей ґрунту нерудної природи та напружень в ґрунтового масиві на глибині до 10 м (тонкий приповерхневий шар). Створена система має невеликі габарити та масу, складається з двох електронних блоків (рис. 3) і може обслуговуватись одним оператором. Інформація для даної системи виводиться у аналоговому вигляді і передається на цифровий накопичувач.



1 – вимірювальний блок;  
2 – блок перетворення частоти;  
3 – з'єднувальний шнур

**Рисунок 3 – Мобільна система моніторингу геодинамічної активності «Пошук-1»**



1 – магістральні газопроводи «Оренбург-Новопсков» і «Союз», 2 – траси зсуву на схилі урочища, 3 – сільськогосподарські угіддя, 4 – дубовий масив

**Рисунок 4 – Зсувна активність ґрунту в зоні контролю**

На практиці дана система моніторингу була успішно застосована під час обстеження ділянки магістрального газопроводу «Союз» (1152 - 1154 км). Метою проведення робіт було виявлення геофізичних аномалій, пов'язаних із порушенням однорідності структури ґрунтів у районі прокладання ділянки газопроводу і визначення можливої зміни динаміки ґрунтів, що може призвести до порушення цілості газопроводу на даній ділянці.

Проведення даної роботи здійснювалось за такими етапами:

- візуальний огляд контрольованої ділянки з фотофіксацією і геоприв'язкою;
- визначення траси пролягання контрольованого газопроводу;
- «поздовжнє» профілювання шляхом визначення розподілу напруженості природного змінного геоелектричного поля Землі для оцінки активності геодинамічних процесів у зоні контролю;
- «перпендикулярне» профілювання для визначення геофізичних аномалій;
- камеральна обробка отриманих результатів;
- формування висновків і розроблення рекомендацій.

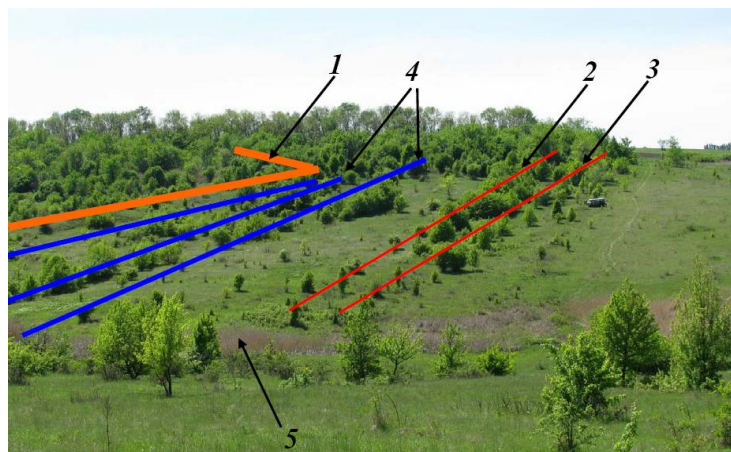
На зсувній ділянці, де проводились дослідження, в одному коридорі пролягають два магістральні трубопроводи – «Оренбург-Новопсков» і «Союз» (рис. 4). Контроль за розвитком зсуву в напрямку до магістральних газопроводів проводився на примітивному рівні – шляхом спостереження за положенням зсувних терас відносно реперів. Інформації щодо причин розвитку зсувних процесів, контура зсуву, напрямку поширення та його активності експлуатуюча організація ДК «Донбастрасгаз» не мала.

Для визначення активності зсуву ґрунтів (визначення зон на ділянці пролягання газопроводу з геодинамічною активністю, коли присутні значні напруження ґрунту, які, в свою чергу, викликають зсуви, розломи і обвали) проведено «поздовжнє» профілювання (знято профілі

напруженості геоелектричного поля Землі) вздовж контрольованої ділянки газопроводу (рис. 5). Проведене «поздовжнє» профілювання не виявило геодинамічних процесів (розвитку зсуву) у приповерхневій області зони контролю.

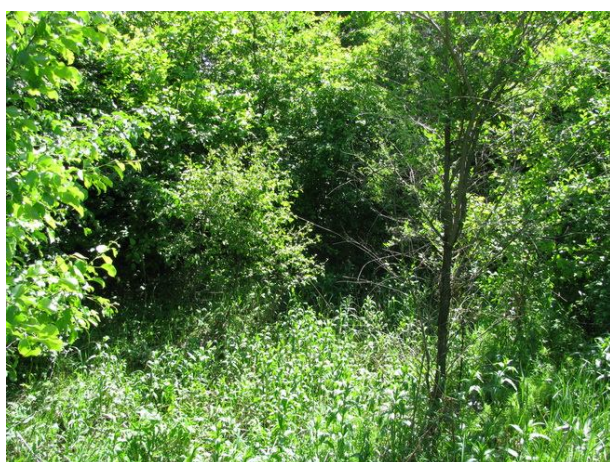


**Рисунок 5 – Проведення вимірювання напруженості геоелектричного поля по профілях за допомогою розробленої мобільної системи моніторингу «Пошук-1» для геодинамічного картування в зоні пролягання контрольованого газопроводу**



1 – границя зсуву, 2 – магістральний газопровід «Оренбург-Новосков»,  
3 – магістральний газопровід «Союз», 4 – водяні жили, 5 – болото

**Рисунок 6 – Активність ґрунтових вод для контрольованої ділянки**



а)



б)

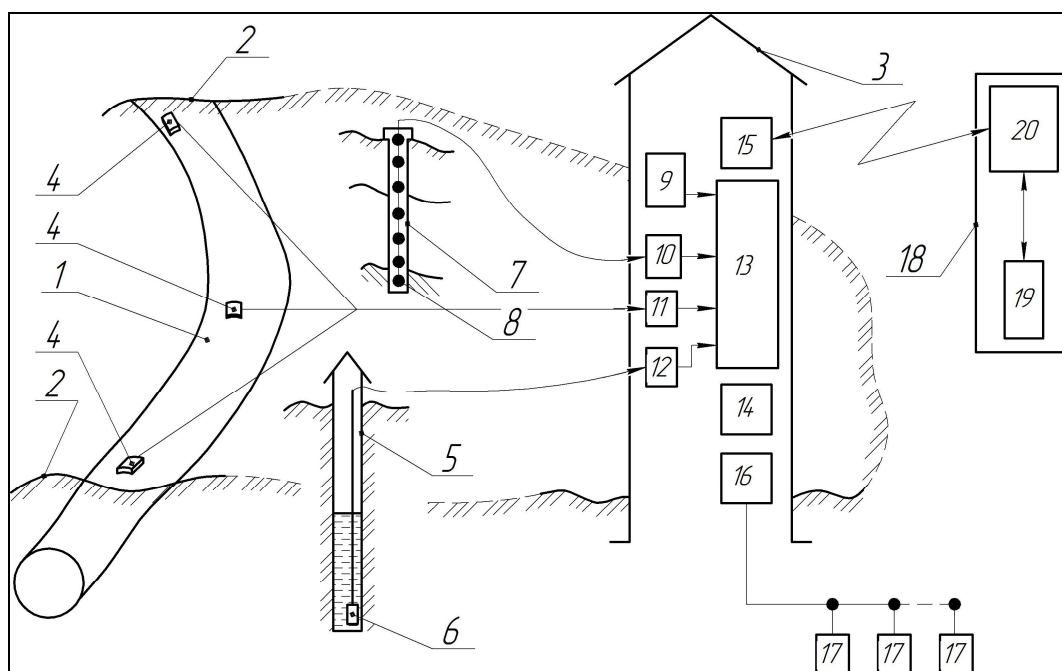
а – зсувна зона (водонасичена); б – діаметрально протилежна зона відносно траси газопроводу

**Рисунок 7 – Характер рослинності для контрольованої ділянки  
(у зоні проведення контролю опадів не було протягом місяця)**

«Перпендикулярне» профілювання було спрямоване на пошук геофізичних аномалій в зоні контролю і їх інтерпретацію шляхом реєстрування змін фазових характеристик фонового геоелектричного поля Землі вздовж профілю ділянки. За допомогою системи «Пошук-1» чітко фіксувалися зміни геоелектричного поля, пов'язані з границями переходу середовищ («ґрунт-труба», «ґрунт-пустота», «ґрунт-рідина», «ґрунт-ґрунт» (наприклад, «пісок-глина»). В результаті «перпендикулярного» профілювання встановлено, що майже паралельно до траси газопроводу зі сторони зсувної ділянки проходять три приповерхневі водяні жили шириною до 1 м, які живлять болото в низовині. В зоні, яка є протилежною до зсувної ділянки відносно траси газопроводу, приповерхневих водотоків не виявлено. Результати «перпендикулярного» профілювання підтверджуються візуально – про наявність приповерхневих водотоків свідчить характерне обліснення в різних зонах поблизу траси газопроводу (рис. 6 і 7). За результатами «перпендикулярного» профілювання було оконтурено границі

зсуву в напрямку траси пролягання магістральних газопроводів (рис. 6).

Виходячи з проведених досліджень за допомогою мобільної системи моніторингу геодинамічної активності «Пошук-1» було зроблено висновок, що причиною зсувної активності в зоні ділянки контролю є ґрунтова вода в приповерхневій області, оскільки інші причини зсуву для даної ділянки відсутні. Так, на досліджуваній ділянці верхній шар ґрунту потужністю 2-3 м є водопроникним і пухким (чорнозем і пісок), а нижній шар – водонепроникний. Вбираючи воду, верхній шар стає «більш важким» і через суттєвий перепад висоти (близько 50 м) ковзає під дією гравітації змоченим слизьким нижнім водонепроникним шаром. Колектором для ґрунтової води є сільськогосподарські угіддя, які розміщуються на вершині схилу. Як видно з панорамної фотографії (рис. 7), зсувні процеси розвиваються по всьому схилі, крім зони, зайнятої дубовим масивом, – коріння дерев всмоктують надлишкову вологу і утримують схил від зсуву.



1 – трубопровід; 2 – межі області з високим геодинамічним ризиком (зсув); 3 – автономний пост накопичення та опрацювання інформації; 4 – тензометричні давачі; 5 – свердловина; 6 – гідростатичний давач рівня ґрунтових вод; 7 – інклінометричний футляр; 8 – масив трикоординатних давачів нахилу; 9 – вимірювач природного імпульсного електромагнітного поля Землі; 10, 11, 12 – блоки узгодження; 13 – мікроконтролерний блок керування та опрацювання; 14 – блок енергонезалежної пам'яті; 15 – радіоблок; 16 – блок живлення; 17 – система ґрунтових термоелектричних генераторів; 18 – мобільний пристрій для зчитування; 19 – блок накопичення даних; 20 – радіоблок у мобільному пристрої

**Рисунок 8 – Система прогнозування геодинамічної небезпеки в зоні пролягання протяжних інженерних споруд**

Результатом роботи із обстеження зсувонебезпечних ділянок магістральних газопроводів «Оренбург-Новопсков» і «Союз» є розроблені рекомендації:

- проводити постійний візуальний моніторинг розвитку зсуву на ділянці газопроводу;
- проводити щорічні вимірювання відстані від крайньої точки зсуву до контрольного репера у весняний період;
- проводити інструментальні вимірювання для визначення активності зсуву ґрунту на ділянці газопроводу раз на 2 роки;
- провести комплексне обстеження технічного стану газопроводу на даній потенційно-небезпечній ділянці з перспективою встановлення постів моніторингу технічного стану даного об'єкта;
- провести заходи із забезпечення охорони на даній ділянці газопроводу, а саме обмеження діяльності людини в районі схилу: вздовж зеленого поясу (заборона вирубування лісу, корчування, знищення кущів і трав'яного покриття); земляних робіт (заборона будь-яких розробок ґрунту в пасивній зоні – біля підніжжя, завантаження схилу в активній зоні – біля брівки, збільшення крутизни схилу, відкривання нестійких ґрунтів); в галузі водного господарства (заборона спускання поверхневих вод і поливів, утримання в належному порядку водовідводів і меліоративних систем; по динамічній

дії (заборона проведення вибухових робіт, роботи важких транспортних засобів);

- проводити заходи щодо закріплення і осушення схилу в зоні зсуву. Тут передбачається суцільне висівання трави, висаджування вологолюбних кущів, заліснення схилу (в'яз, дуб, клен, липа, модрина).

Проведені дослідження свідчать, що за допомогою розробленої системи «Пошук-1» можна швидко проводити обстеження з метою попереднього оцінювання геодинамічної небезпеки в зоні пролягання протяжних інженерних споруд (обстеження потенційно-небезпечної ділянки пролягання газопроводу 600×600 м було проведено за 2 год).

#### **Стационарна система прогнозування геодинамічної небезпеки в зоні пролягання магістральних газопроводів**

Розроблена система (рис. 8) містить: набір давачів з нормуючими пристроями (4, 6, 8, 9), мікропроцесорний пристрій (13) для зчитування, накопичення, обробки та передачі інформації у складі автономного поста (3), пристрої для забезпечення автономного живлення (16, 17) і мобільний пристрій для зчитування інформації через радіоканал (18).

Як первинні джерела інформації про рух ґрунту в геодинамічній зоні використано:

- група тензодавачів деформації (4) трубопроводів (1);
- масив трикоординатних давачів нахилу (8), встановлених у вертикально заглибленому інклінометричному футлярі (7);
- гідростатичний давач рівня ґрунтових вод (6) у свердловині (5) контрольованої ділянки;
- вимірювач природного імпульсного електромагнітного поля Землі (9), антена якого встановлена на автономному пості (3).

Враховуючи суттєві відмінності між інтенсивностями сигналів різних давачів та їх вихідних опорах, для кожного давача розроблено свій інтерфейсний пристрій (10, 11, 12). Зазначені пристрої здійснюють підсилення, аналого-цифрове перетворення і передавання інформації в мікропроцесор по стандартному SPI інтерфейсу.

Для зчитування накопиченої і обробленої мікропроцесорним пристроєм інформації використано модуль Bluetooth інтерфейсу (15) у складі автономного поста (3) і радіоблок (20) у складі мобільного пристрою зчитування (18).

Для систем контролю із зазначеною структурою важливим є питання забезпечення стабільності електроживлення. Акумуляторні пристрої живлення, навіть при використанні схем енергозбереження, забезпечують роботу системи тільки протягом одного-двох місяців при плюсовій температурі і без дозарядки. Для вирішення зазначеної проблеми нами використано термоелектричне джерело АЛТЕК-8027 (Інститут термоелектрики, Україна), призначене для забезпечення електричною енергією сигналізаційної та охоронної апаратури, радіомаків, метеорологічних станцій, різних пристроїв та приладів радіоелектронної техніки в польових умовах. Термоелектричний джерело електричної енергії працює на основі прямого перетворення теплової енергії ґрунту в електричну.

Термоелектричний генератор заглиблюється в ґрунт і, в залежності від кліматичних умов, може працювати в двох режимах. У теплу пору або денний час доби тепловий потік з більш нагрітих шарів ґрунту надходить на верхній концентратор генератора, який передає тепло гарячим спаям термоелектричного модуля, розташованого під концентратором. Холодні спай термоелектричного модуля контактують з тепловідводами, що мають низький тепловий опір, якими тепло, що пройшло через термоелектричний модуль, надходить на нижній концентратор та розсіюється у більш холодні шари ґрунту. У холодну пору або нічний час доби тепловий потік надходить на нижній концентратор з більш теплих шарів ґрунту і тепловідводом передається на термоелектричний модуль. Верхній концентратор в цьому випадку розсіює тепло що проходить через термоелектричний модуль.

Корпус термоелектричного генератора виконаний з біо- та гідростійкого теплоізолюючого матеріалу, концентратори захищені антикорозійним покриттям. При роботі термоелектричного генератора відсутні акустичні шуми.

Термоелектричний генератор, вміщений в ґрунт, працює в важкодоступних місцях без втручання обслуговуючого персоналу. Термоелектричний генератор є екологічно чистим джерелом електричної енергії.

Для створення системи моніторингу нахилу ділянки ґрунту використовували масив трикоординатних мікромеханічних давачів нахилу (8), придатних за своїми параметрами для безперервного спостереження природних об'єктів та інженерних споруд.

Кожен давач розміщується на індивідуальному жорсткому стрижні-основі. Давач разом з приєднаним до нього кабелем вмонтований у відрізок гнучкої оболонки, що має форму трубки. Довжина кожного фрагмента в залежності від завдання становить 0,75, 1,25, 2,25 метра. При цьому всі давачі з'єднані загальним кабелем, яким подається живлення і проводиться зчитування інформації.

При моніторингу загальна оболонка з масивом давачів закріплюється в спеціально пробуреній свердловині (рис. 8). За необхідності весь масив може бути витягнутий для повторного використання або ремонту.

Інформація про зсуви формується на основі аналізу зміни кутів відносно початкової орієнтації давачів. З цією метою застосовується спеціально розроблене програмне забезпечення. Воно дозволяє відтворити безперервну траєкторію, уздовж якої розміщуються давачів в момент зняття вимірів, а також накопичувати інформацію, оцінювати величину і напрямок зсуву траєкторії.

Результати моніторингу зсувів з використанням гнучких масивів давачів підтвердили можливість проведення вимірювань з необхідною точністю. У вертикальні свердловини довжиною 10 метрів було встановлено масиви давачів з кроком розміщення 1,5 метра. За результатами вимірювань чутливість до зсуву була оцінена в межах 1-2 мм, точність  $\pm 2$  мм.

Гідростатичний давач рівня ґрунтових вод (6) контрольованої ділянки реалізований на основі інтегрального напівпровідникового давача диференціального тиску стовпа води в свердловині (5). Вихідний сигнал давача аналоговий, термокомпенсований і нормований за амплітудою, що дозволяє, після аналого-цифрового перетворення в модулі узгодження (12), використовувати його інформацію в мікропроцесорному модулі обробки інформації. Для передачі різниці тиску стовпа рідини на вхідні штуцери давача диференціального тиску використані дві металеві трубки діаметром 4 мм: одна прокладена від штуцера до нижньої точки свердловини, а друга – від другого штуцера давача до точки, розміщеної на 1,5 м нижче поточного рівня рідини в свердловині. Таким чином, сигнал на виході давача пропорційний поточному рівню ґрунтових вод.

Група тензодавачів деформації (4) трубопроводів (1) реалізована на базі використання як сенсорів деформації класичних фольгованих тензорезисторних розеток, включених за мостовою схемою. Як зчитувальний пристрій ви-



користані модулі власної розробки на базі спеціалізованих інтегральних мікросхем дельта-сигма АЦП ADS 1234IPW (Texas Instruments). Зазначені модулі встановлюються безпосередньо біля ділянки вимірювання, виключаючи вплив на результати контролю ліній зв'язку давачів-АЦП. Вихідний сигнал модуля АЦП подається в пристрій узгодження (11) у вигляді цифрового коду за послідовним SPI інтерфейсом.

В основі роботи останнього компонента даної системи – вимірювача природного імпульсного електромагнітного поля Землі – лежить метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ). Електромагнітні поля, джерела яких знаходяться в надрах Землі, є первинним об'єктом геофізичних досліджень. А.А. Воробйов, ввівши поняття "природного імпульсного електромагнітного поля Землі", розумів під ним весь комплекс електричних розрядів, які постійно утворюються у всіх сферах нашої планети і в космічному просторі, але, в першу чергу, мав на увазі саме ті, які генеруються в її надрах гірськими породами.

Даний метод знаходить останнім часом все ширше застосування для картування малоамплітудних тектонічних порушень на шахтних полях, вирішенні інженерно-геологічних та геолого-екологічних завдань [14]. Методом ПЕМПЗ можуть ефективно вирішуватися завдання, пов'язані із вивченням напруженого стану гірських порід. При дослідженні зсувних процесів в Карпатського регіоні, що активізувалися в 1998-2001 і 2008 роках, даний метод був застосований незалежно, поряд з іншими геофізичними методами, всіма геологогеофізичними підприємствами та науковими інститутами, які були залучені до виконання польових робіт.

Недоліки методу закладені в самій природі електромагнітних хвиль. Випромінювання утворюються в результаті процесів, що проходять в надрах Землі і на її поверхні, а також в атмосфері, в магнітосфері, в іоносфері і в космосі, тобто залежать від багатьох факторів. Тому однією з основних проблем при дослідженнях методом ПЕМПЗ є виділення сигналів, пов'язаних з напружено-деформованим станом порід, на тлі всіх інших, що становлять варіації цього поля [13].

Враховуючи зазначені вище проблеми методу і пристрою ПЕМПЗ, а також згаданих вище пристроїв контролю, пов'язаних з впливом перешкод на результат прогнозування зсувних процесів у геодинамічній зоні, нами за допомогою мікроконтролерного модуля обробки сигналів давачів реалізовано алгоритм штучної нейронної мережі. Мета застосування алгоритму – максимальне відстроювання від сигналів, які не є для нас інформаційними, тобто некорельованих із змінами напружено-деформованого стану порід [15, 16].

Для реалізації поставленої мети програмно реалізований нейромережевий алгоритм обробки – розпізнавання образів на базі мережі типу багатощаровий перцептрон. Вхідним образом є

значення синхронно зареєстрованих сигналів від вище описаної групи чотирьох давачів: тензодавачів деформації (4) трубопроводів (1); трикоординатних давачів нахилу (8); гідростатичного давача рівня ґрунтових вод (6); вимірювача природного імпульсного електромагнітного поля Землі (9).

Сигнали з перших трьох давачів (4, 8, 6) після нормування подаються відповідно на перші три входи нейронної мережі. Сигнал вимірювача природного імпульсного електромагнітного поля Землі (9) підлягає попередньому опрацюванню методом символізації, запропонованим в [9, 10, 11, 12] Дане опрацювання реалізоване наступним чином.

В процесі попередньої обробки реалізації інформаційного сигналу давача природного імпульсного електромагнітного поля Землі після його підсилення та нормалізації виконується дискретизація аналогового сигналу за часом та квантування за рівнем – аналого-цифрове перетворення (АЦП). Результат роботи АЦП – значення в діапазоні від 0 до 63 (від 0 до  $2^{6-1}$  при шестирозрядного АЦП), пропорційні значенням нормалізованих сигналів давачів. В оперативній пам'яті мікроконтролера виділено 64 комірки (з адресами від 0 до 64). Після кожного аналого-цифрового перетворення відліку інформаційного сигналу вміст тієї комірки пам'яті давача збільшується на 1 (інкрементується), адреса якої дорівнює значенню сигналу, отриманому в результаті аналого-цифрового перетворення конкретного відліку сигналу. Таким чином, результат аналого-цифрового перетворення інформаційного сигналу – число – сприймається процесором як адреса комірки, яку треба інкрементувати (збільшити на 1). Дана операція виконується досить швидко, а швидкість такої символізації сигналу залежить тільки від швидкодії модуля АЦП перетворення. В процесі такої обробки сигналу в 64-рйох комірках пам'яті буде, по-суті, оцінка функції густини розподілу вибірки інформаційного сигналу. Поділивши значення в кожній з цих комірок пам'яті на загальну кількість АЦП перетворень сигналу за час спостереження, отримуємо в пам'яті символно-послідовну гістограму розподілу енергії інформаційного сигналу.

Таким чином, нейронна мережа має 67 входів (3+64) і три шари: вхідний (67 вхідних нейронів), прихований (20 нейронів) і один вихідний шар (1 нейрон). В нейронах прихованого і вихідного шарів, як функцію активації використано сигмовидну функцію. Навчання мережі з учителем виконувалося за допомогою алгоритму зворотнього поширення помилки. Результатом навчання було отримання матриць вагових коефіцієнтів мережі, які програмувалися в енергонезалежну пам'ять контролера типу dsPIC33FJ256MC510A (Microchip). Зазначені вагові коефіцієнти визначалися за допомогою модуля (toolbox) Neural Network ППП MATLAB. Для навчання використовувалися зареєстровані системою дані в умовах дослідного полігону і штучно імітованих зсувних процесів.

Вихід нейронної мережі – бінарний. Він сигналізує про наявність або відсутність процесів зсуву або напруги в геодинамічній зоні. На етапі досліджень системи в окремий модуль енергонезалежної пам'яті на ММС карті записувались поточні цифрові значення тензодавачів деформації (4) трубопроводів (1); трикоординатних давачів нахилу (8); гідростатичного давача рівня ґрунтових вод (6); а також результати символізації сигналів вимірювача природного імпульсного електромагнітного поля Землі (9) та значення на виході нейронної мережі.

Двомісячна апробація методу контролю у польових умовах довела інформативність методів та засобу контролю зсувних процесів, а також вищу достовірність такого контролю за умови застосування нейромеревих методів опрацювання інформації давачів сигналів.

Прогнозування ступеня геодинамічної небезпеки в зоні пролягання протяжних інженерних споруд найбільш доцільно проводити з врахуванням визначення геодинамічного ризику в даній зоні, що дасть можливість зменшити вплив людського фактору, а за відомим ступенем ризику можна коректно спланувати програму ремонтних робіт.

Геодинамічний ризик тісно пов'язаний з конкретним промисловим об'єктом (в нашому випадку – трубопроводи), геологічними умовами прокладання трубопроводу, його технічним станом і є кількісною характеристикою геодинамічної небезпеки та відноситься до групи факторів ризиків природного походження. Одним із факторів зростання рівня геодинамічного ризику є проходження інженерними протяжними об'єктами границь геодинамічноактивних блоків – розломів, що стає причиною підвищення кількості аварійних ситуацій.

При проходженні протяжних інженерних споруд в геодинамічній зоні, геодинамічний ризик можна оцінити за формулою [17]:

$$R = P * V, \quad (1)$$

де  $P$  – ймовірність настання негативної геодинамічної події;

$V$  – вразливість інженерної споруди при настанні негативної геодинамічної події [6], яка визначається за формулою:

$$V = U / S, \quad (2)$$

де  $U$  – збитки від настання негативної геодинамічної події;

$S$  – повна вартість інженерного об'єкта.

Оцінювання  $U$  збитків від потрапляння об'єкта в геодинамічну зону здійснюють за формулою:

$$U = \rho_{ГД} \cdot U_{СР} \cdot l_{ГД}, \quad (3)$$

де  $\rho_{ГД}$  – питома густина аварій, які відбулися під впливом геодинамічних небезпечних зон;

$U_{СР}$  – середнє значення збитків від одної аварії на об'єкті, що спостерігається;

$l_{ГД}$  – довжина частини інженерної споруди, що перетинає геодинамічну небезпечну зону (ГНЗ).

Питома густина аварій  $\rho_{ГД}$  розраховується з виразу:

$$\rho_{ГД} = \rho_{ГНЗ} - \rho_{\Phi}, \quad (4)$$

де

$$\rho_{ГНЗ} = N_{ГНЗ} / L_{ГД}, \quad (5)$$

де  $N_{ГНЗ}$  – загальна кількість аварій, які відбулися в геодинамічних небезпечних зонах;

$L_{ГД}$  – сумарна довжина ділянок трубопроводів, що перетинаються геодинамічними небезпечними зонами.

Питома густина аварій, що відбулися поза геодинамічно небезпечними зонами:

$$\rho_{\Phi} = N_{\Phi} / L_{\Phi}, \quad (6)$$

де  $N_{\Phi}$  – загальна (фонова) кількість аварій, що відбулися за поза геодинамічних небезпечних зон;

$L_{\Phi}$  – загальна довжина трубопроводу без врахування  $L_{ГД}$ .

Величину середніх збитків  $U_{СР}$  від однієї аварії на протяжних інженерних спорудах і екологічну складову цих збитків можна оцінити відповідно до існуючих методик оцінки збитків від аварій на інженерних об'єктах.

Для побудови карти геодинамічного ризику довжина частини інженерного об'єкта, що перетинається геодинамічно небезпечною зоною, приймається рівною  $l_{ГД} = 1$  м.

На відміну від класичного підходу, ймовірність настання негативної геодинамічної події  $P$ , пропонується проводити з використанням вищеописаного методу у комплексі з використанням штучних нейронних мереж, оскільки визначення ймовірності є дуже складним, трудомістким і багатопараметровим завданням, особливо в районі попередньо недосліджених геодинамічних небезпечних зон. У нашому випадку вихід нейронної мережі буде знаходитись в діапазоні 0...1 з кроком 0,01.

## Висновки

У ході проведених досліджень розроблено блок-схему, алгоритм роботи та проведено випробування системи раннього попередження для прогнозування геодинамічної небезпеки в зонах пролягання протяжних інженерних споруд. Проаналізовано основні причини виникнення аварійно небезпечних ситуацій на протяжних інженерних спорудах. З метою прогнозування геодинамічної небезпеки в зоні пролягання протяжних інженерних споруд пропонується використовувати комплексний метод розрахунку, що базується на використанні методів визначення геодинамічного ризику та нових методів оброблення вимірювальної інформації на базі штучних нейронних мереж, що дозволить мінімізувати людський фактор та вірно спланувати програму ремонтних робіт.

## Література

1 Геодинамика. Основы кинематической геодезии: монография / С.П. Войтенко, И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, Б.Б. Капочкин. – Одесса: Астропринт, 2007. – 264 с.

2 Guidelines for Constructing Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines Through Areas Prone To Landslide and Subsidence Hazards (PRCI L52292e), <http://prci.org>.

- 3 Rowlands, K.A., Jones, L.D., Whitworth, M., 2003, Landslide laser scanning: a new look at an old problem, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 36, p. 155-157.
- 4 Jones, L.D., 2006, Monitoring landslides in hazardous terrain using terrestrial LiDAR: an example from Montserrat, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 39: p. 371-373.
- 5 Malinnikov, V.A., Uchaev, D.V., 2008, The use of multifractal analysis for the detection of landslide structures on aerospace images, Izvestia vuzov «Geodezia & aerofosyemka», v. 6, p. 12-18.
- 6 Кузичкин О. Р. Теоретические основы автоматизированного электромагнитного контроля геодинамических объектов: Автореф. дисс. – д.т.н. / Орловский государственный технический университет, 2008. – 32 с.
- 7 Кузьменко Е.Д., Безсмертний А.Ф., Вдовина О.П., Крив'юк І.В., Чебан В.Д., Штогрин Л.В. Дослідження зсувних процесів геофізичними методами: монографія. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 294 с.
- 8 Yavorskyi A.V., 2011, Rybitskyj I.V., Raiter P.M., Vaschyhak S.P. Mobile monitoring of geodynamic activity in the area of oil and gas pipelines, Scientific Proceeding №1(121) p. 89-92.
- 9 Tang X.Z., Tracy E.R., Boozer A.D., deBrauw A., Brown R. (1995). "Symbol sequence statistics in noisy chaotic signal reconstruction", Physical Review E 51:5, 3871–3889.
- 10 Lehrman M., Rechester A.B., White R.B. (1997). "Symbolic analysis of chaotic signals and turbulent fluctuations", Physical Review Letters 78:1, 54–57.
- 11 Tang X.Z., Tracy E.R., Brown R. (1997). "Symbol statistics and spatio-temporal systems", Physica D 102, 253–261.
- 12 Raiter P.M., 2004, Symbolization signals hydrodynamic pressure fluctuations flow for neural control structure multiphase flow, Methods and instrument of quality control № 12, p.70-74.
- 13 Olga Walder, Mathematical Methods for Engineers and Geoscientists 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg - ISBN: 978-3-540-75298-1
- 14 Raphael A. Viscarra Rossel, Alex B. McBratney, Budiman Minasny (Ed.) Proximal Soil Sensing, Springer Science+Business Media B.V. 2010 - ISBN 978-90-481-8858-1
- 15 Roy E. Hunt, Geotechnical engineering investigation handbook/Roy E. Hunt.—2nd ed. 2005 by Taylor & Francis Group, LLC - ISBN 0-8493-2182-4
- 16 J. F. Martín-Duque, C. A. Brebbia, D. E. Emmanouloudis, U. Mander (Edt), Geo-Environment and Landscape Evolution II Evolution, Monitoring, Simulation, Management and Remediation of the Geological Environment and Landscape, WIT Press 2006, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, SO40 7AA, UK - 1-84564-168-X
- 17 Болотный Р.А. О закономерности увеличения аварийности при сокращении расстояния между инженерным объектом и границей геодинамически активной зоной – в мегаполисах // Состояние и перспективы развития университетских технопарков как механизмов интеграции вузовского сектора науки, образования и производства и как механизма поддержки создания и развития малых и средних инновационных предприятий: Материалы науч. конф. (г. Москва, 1 – 3 октября 2008 г.) / Федер. агентство по науке и инновациям. Ассоциация «Технопарк»; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – С. 86 – 92.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*05.09.12*

*Рекомендована до друку професором  
Карнашем О.М.*