

УДК 624.131.537:550.34

Писецкий Владимир Борисович

доктор геолого-минералогических наук,
профессор,
заведующий кафедрой геоинформатики
Уральского государственного
горного университета,
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
e-mail: pisetski@yandex.ru

Лапин Сергей Эдуардович

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
и компьютерных технологий
Уральского государственного
горного университета
e-mail: pisetski@yandex.ru

Зудилин Александр Эдуардович

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры геоинформатики
Уральского государственного
горного университета
e-mail: pisetski@yandex.ru

Патрушев Юрий Владимирович

преподаватель кафедры геоинформатики
Уральского государственного
горного университета
e-mail: up_patr@mail.ru

Шнайдер Иван Владимирович

преподаватель кафедры автоматизации
и компьютерных технологий
Уральского государственного
горного университета
e-mail: pisetski@yandex.ru

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ
СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО
МАССИВА “МИКОН-ГЕО” В ПРОЦЕССЕ
ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ
И УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Аннотация:

Рассматривается проблема организации системы сейсмического контроля в процессах ведения горнотехнических работ в подземных условиях с целью прогноза опасных геодинамических явлений и выполнения федерального регламента безопасности проходческих и добычных работ на рудных и угольных шахтах. Программно-технические средства системы “МИКОН-ГЕО” ориентированы на регистрацию и анализ сейсмического волнового поля в активном режиме воздействия горных механизмов на горный массив и регистрацию поля сейсмической эмиссии в пассивном режиме. Вероятность наступления опасного геодинамического явления прогнозируется на основе интегрированного критерия, определяемого по оценкам градиента горного давления (активный параметр) и оценкам сейсмоэнергетического состояния массива (пассивный параметр).

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.058

Pisetzky Vladimir B.

doctor of mineralogical and geological sciences,
professor,
The head of geo-informatics department,
The Ural State Mining University,
620144, Yekaterinburg, Kuibyshev st., 30
e-mail: pisetski@yandex.ru

Lapin Sergey E.

associate professor,
candidate of technical sciences
The automation of computer technologies
department
The Ural State Mining University,
e-mail: pisetski@yandex.ru

Zudilin Alexander E.

candidate of geologic and mineralogical sciences,
the associate professor
of geo-informatics department,
The Ural State Mining University
e-mail: pisetski@yandex.ru

Patrushev Yury V.

the lecturer,
geo-informatics department
The Ural State Mining University
e-mail: up_patr@mail.ru

Shnaider Ivan V.

the lecturer,
automation and computer technologies department,
The Ural State Mining University
e-mail: pisetski@yandex.ru

**METHODS AND RESULTS OF INDUSTRIAL
SEISMIC MONITORING APPLICATION
THE STATE OF ROCK MASS
"MIKON-GEO" IN THE PROCESS
OF ORE AND COAL DEPOSITS
UNDERGROUND MINING**

Abstract:

The problem of arrangement the system of seismic monitoring in the processes of mining and engineering operations performing in underground conditions aimed at forecasting dangerous geodynamic phenomena and ion of federal regulations performing safety tunnel and mining operations at ore and coal mines is considered. Software and hardware of the "MIKON-GEO" system are focused on seismic wave field recording and analysis in active mode of mining mechanisms impact on rock mass and field seismic emission registration in the passive mode. The probability of dangerous geo-dynamic phenomena coming is predicted in terms of integrated criteria defined by rock pressure gradient estimation (active parameter) and seismic energy rock mass state estimation (passive parameter).

Принципиальный механизм формирования и внезапного изменения состояния устойчивости массива горных пород в границах природно-технической системы “геологическая среда – выработка – крепь” (далее – *горный массив*) в зоне влияния проходческих или добычных работ определяется структурой и параметрами напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива. Размеры зоны влияния подземных горнотехнических работ на структуру и параметры НДС горного массива определяются многими факторами, включая технологии ведения работ и крепления выработок [1].

Выбор и формулировка цели разработки систем и технологий контроля и прогноза риска развития опасных геодинамических явлений (вывал, выброс, горный удар и т. п.) определяются не только очевидной необходимостью дистанционной оценки структуры и параметров зоны влияния с размерами несколько десятков метров во все стороны от забоя выработки, но и регламентными требованиями правил безопасности ведения подземных горных работ в соответствующих ведомствах [2]. Последнее имеет безусловное и существенное значение.

Методика и система сейсмического контроля и прогноза состояния устойчивости горного массива в процессах ведения подземных работ

Дистанционная оценка структуры и относительных значений параметров НДС на расстоянии от нескольких метров до первых десятков и сотен метров от подземной выработки основана на применении сейсмических методов, поскольку сейсмическое волновое поле наведенной или эмиссионной природы прямым функциональным образом связывает тензор «малых» напряжений сейсмической волны в точках отражения, прохождения или излучения сейсмических волн с тензором «больших» напряжений, действующих в этих же точках горного массива (фундаментальное волновое уравнение М. Вiot [3]). В этом смысле альтернативы сейсмическому методу нет, и актуальными задачами реализации требований федерального закона об обязательном текущем и локальном сейсмическом контроле и прогнозе развития опасных геодинамических явлений (ГДЯ) являются проблемы разработки эффективных программно-технических средств непрерывного сейсмического контроля горного массива в ближней и дальней зонах ведения горнотехнических работ [2].

Учитывая особенности технологий подземной разработки горного массива (механизированные и взрывные работы), предпочтение следует отдавать методу отраженных волн в варианте сейсмолокационного обзора (многократная система приема на сравнительно короткой базе с возможностью «просмотра» массива в необходимом направлении – низкочастотный аналог УЗИ в медицине). Источники импульсного (удары кувалдой, гидромолот, взрывы в шпурах и т. п.) и кодо-импульсного типов (ротатор комбайна) возбуждения волновых полей обеспечивают обзор массива в сигналах отраженных волн до 50 – 100 м.

Система регистрации упругих волн предполагает произвольное размещение трехкомпонентных (3С) цифровых геофонов с апертурой приема, распределенной на базе не менее 20 м, на бортах подготовительного штрека или транспортного тоннеля вблизи груди забоя (за проходческим комбайном) или на бортах вентиляционных штреков вблизи очистного забоя, перемещающихся по мере его продвижения. Для получения сейсмического 3D изображения горного массива приемлемого качества необходимо и достаточно шести 3С-геофонов. Данные от цифровых 3С-геофонов передаются стандартным протоколом RS-485 по штатным линиям связи (медь, оптоволокно) и обрабатываются в непрерывном автоматическом режиме на верхнем уровне диспетчерского пункта управления многофункциональной системы безопасности шахты.

Принцип локализации сейсмических сигналов в активном режиме (регистрация волнового поля при силовом воздействии на забой) сохраняется и для пассивного режима регистрации сейсмических событий (режим “тишины”), что позволяет регистрировать с накоплением векторное поле сейсмоакустической эмиссии. В этом режиме результатом

являются оценки сейсмоэнергетического состояния горного массива (в джоулях) в том же объеме пространства, что и в активном режиме локации. Оценки сейсмической энергии по данным пассивного режима локации и относительные оценки градиента горного давления по данным сейсмической локации в активном режиме позволяют определить комплексный сейсмический атрибут во всех точках контролируемого пространства массива с разрешением порядка $1/3$ длины волны (3 – 5 м).

Вероятность наступления опасного ГДЯ для конкретных геологических и геодинимических условий определяется на основе установленной статистической связи комплексного сейсмического атрибута с регламентными определениями НДС инструментальными методами (объем выхода “штыба”, дискование керна и т. п.). Опыт получения таких связей свидетельствует о достаточно высоком уровне детерминации (около 70 %), что вполне обоснованно позволяет не только существенно сократить объем обязательных инструментальных определений уровня опасности, но и принципиально повысить детальность и объективность прогноза развития опасного ГДЯ на значительных удалениях от проходческого или добычного забоев.

В полной мере названные выше функциональные параметры системы сейсмического контроля горного массива реализованы в аппаратно-программном комплексе МИКОН-ГЕО [4], технические средства которого в максимальной степени удовлетворяют специфике и регламенту технологий ведения подземных горных работ, включая опасные по взрыву угольные шахты. Серийный выпуск этой аппаратуры организован заводом Сибгеофизприбор (г. Новосибирск).

Система непрерывной обработки результатов регистрации полного набора векторных компонент волнового поля AZON обеспечивает получение в реальном времени (с задержкой 5 – 6 сек) устойчивого трехмерного сейсмического изображения горного массива в сигналах отраженных волн различной поляризации в активном режиме локации и пространственную оценку сейсмоэнергетического состояния массива в абсолютных единицах энергии (джоули) в пассивном режиме. Названные выше сейсмические оценки позволяют перейти к трехмерному массиву комплексного сейсмического атрибута и осуществить его последующую трансформацию в регламентные оценки вероятности развития опасного ГДЯ. Размер такого массива может составлять объем пространства с размерами до $100 \times 100 \times 200$ м, что примерно соответствует объему зоны активного влияния проходческого или очистного забоев на горный массив (включая зону опорного давления).

Отметим, что программно-технический комплекс “МИКОН-ГЕО” по целевым параметрам контроля состояния устойчивости горного массива не только не уступает зарубежным аналогам (True Reflection Tomography, RockVision3d, USA, Tunnel Seismic Tomography, КНР и др.), но и выгодно отличается от них оригинальным принципом интегрирования независимых сейсмических параметров сигналов отраженных и эмиссионных волн.

Результаты применения сейсмической системы контроля и прогноза риска развития опасных геодинамических процессов

В условиях г. Сочи проходка транспортных тоннелей (2010 – 2013 гг.) повсеместно совпадала с направлением субгоризонтальной слоистости сочинской свиты осадочных отложений преимущественно аргиллитового состава. Следовательно, если принять за основу риска развития опасных геодинамических процессов элементы блоковой структуры горного массива, то регистрацию устойчивых отраженных волн в конусе сейсмического обзора с осью, направленной по слоистости, можно отождествлять только с вертикальными бортами геодинамических блоков (узкие зоны дезинтеграции массива неотектонического или техногенного генезиса). Именно эти элементы горного массива и приводили к ряду аварийных ситуаций в форме внезапных провалов дневной поверхности с завалом забоя тоннеля.

На рис. 1 приведено типичное сейсмическое изображение горного массива на дистанцию 50 м вперед от забоя тоннеля, на котором отчетливо фиксируются характерные интервалы регистрации сигналов отраженных волн, связанных с зонами опорного давления и дезинтеграции массива горных пород. В процессе мониторинга строительства тоннелей в г. Сочи (8 тоннелей с общей протяженностью более 16 км) применение метода сейсмической локации в технологическом режиме на более чем 3500 забоях в период 2010 – 2013 гг. показало достаточно высокую достоверность своевременного прогноза зон повышенного риска развития опасных явлений (вывал породы в тоннель, обильный водоприток и т. п.). Оценка достоверности по факту применения этого метода составила уровень детерминации около 70 %.

Специализированная сейсмическая система МИКОН-ГЕО в период 2012 – 2015 гг. проходила испытания и введена в опытное промышленное применение на рудных и угольных шахтах Урала, Печерского, Донецкого и Кузнецкого бассейнов (СУБР, шахты “Алмазная”, “Комсомолец Донбасса”, Байкаимская, Распадская, Юбилейная, Есаульская и др.). Функционирование сертифицированной системы для угольных шахт на нижнем уровне регистрации данных (подготовительный или очистной забой) не требует привлечения квалифицированного персонала как в варианте непрерывного текущего контроля, так и в вариантах локального применения в зонах периодического контроля состояния целиков, кровли и решения других задач в конкретных горно-геологических условиях.

На рис. 2 показаны результаты испытания системы МИКОН-ГЕО на Северо-Уральском бокситовом руднике на шахте Кальинской в проходческо-добычном штреке на глубине около 1000 м. Регистрировалось волновое поле в активном режиме локации с синхронизацией буровзрывных работ (16 взрывов на забое с задержкой 0,5 сек) и в пассивном режиме в паузах горнотехнических работ. В результате этих исследований получены пространственные оценки сейсмоэнергетического состояния шахтного поля в различных временных интервалах и относительные оценки градиента давления в ближней зоне забоя штрека (размер контролируемого пространства массива составил 100×100×200 м). Получены уверенные совпадения зон с высокой энергией сейсмической эмиссии (сигналы “тресков” и микроударов в пассивном режиме) с зонами дезинтеграции массива по данным сигналов отраженных волн, регистрируемых в режиме активной локации.

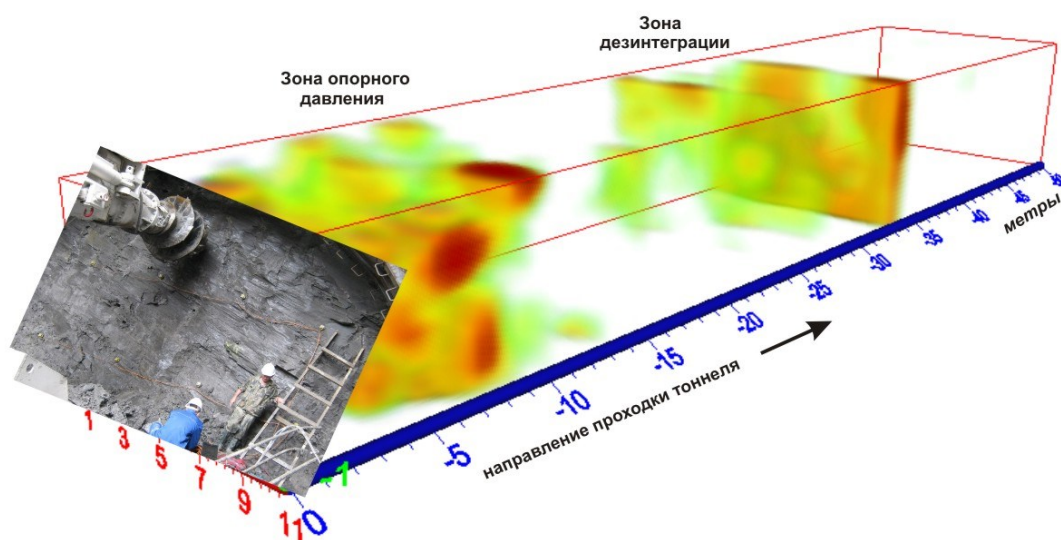


Рис. 1 – Пространственное изображение оценок относительных значений градиента давления по данным сейсмолокационного обзора горного массива впереди забоя транспортного тоннеля (Дублер Курортного проспекта, г. Сочи, 2013 г.)

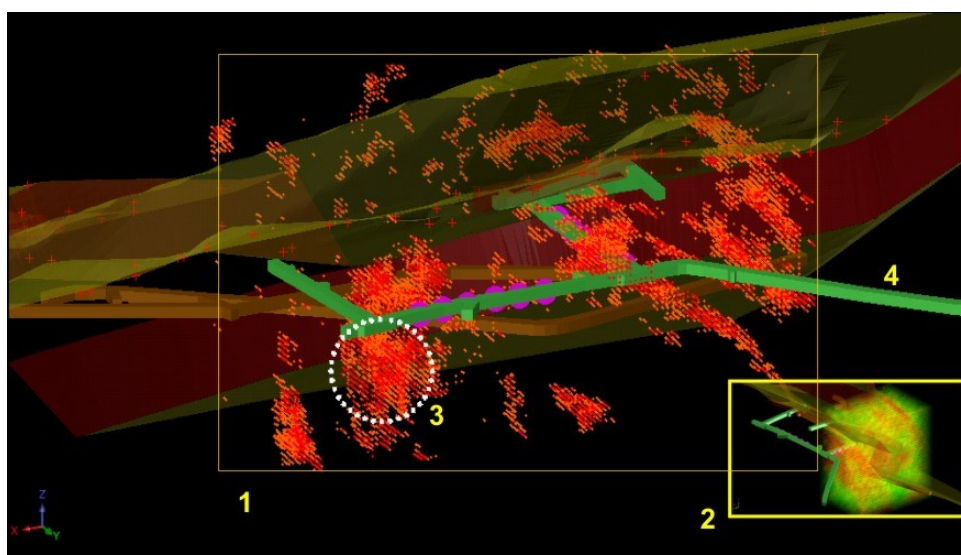


Рис. 2 – Результаты сейсмического контроля шахтного поля в пассивном и активном режимах сейсмолокации (шахта Кальинская, СУБР, 2013 г.):
1 – оценки сейсмознергетического состояния шахтного поля (пассивный режим);
2 – оценки градиента давления по данным сейсмолокации в активном режиме ведения буровзрывных работ;
3 – область опасной концентрации сейсмической энергии;
4 – проходческо-добычные штреки

На рис. 3 приведен скриншот монитора диспетчера системы МИКОН-ГЕО, на котором в непрерывном режиме отображается куб сейсмического обзора в процессе проходческих работ в регламентных оценках НДС (оценки приведены к объему выхода “штыба” в литрах – инструментального метода текущего контроля НДС, обязательного к применению на удароопасных и выбросоопасных пластах). По требованию службы контроля шахты на этом же мониторе отображается ряд графиков относительных оценок относительных значений общего горного давления в прошедший период, на текущий момент контроля и на заданный интервал “вперед” вдоль оси подготовительной выработки, первичная информация (сейсмограммы после трансформации из кодоимпульсного в импульсный формат), графики энергии воздействия комбайна на забой, частота и накопленная энергия сейсмических событий в режимах остановки горнотехнических работ и т. п.

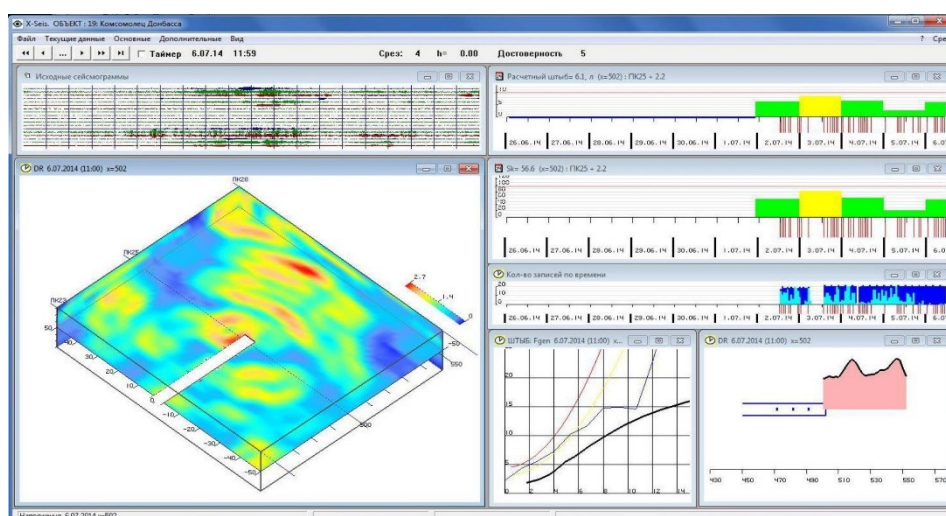


Рис. 3 – Экран монитора диспетчера наземной службы текущего сейсмического контроля процесса проходческих работ в подготовительном штреке (шахта “Комсомолец Донбасса”, г. Донецк, 2014 г.)

На рис. 3 в сейсмическом кубе оценок текущего напряженного состояния массива хорошо заметна зона опорного давления с характерной пространственной конфигурацией (желто-красные тона раstra). Превышение уровня этих оценок за порог, установленный для данной глубины, вызывает появление на мониторе визуального и звукового сигналов “опасно” с указанием дальности в метрах до опасной зоны. В данном варианте испытаний МИКОН-ГЕО на шахте “Комсомолец Донбасса” получен опыт функционирования системы в режиме непрерывного контроля и прогноза риска развития опасных геодинамических процессов с дублированием обработки по IP – протоколу на удаленном сервере (управление системой осуществлялось из Екатеринбурга до тех пор, пока не наступили известные фатальные события, после чего шахта переведена в режим “сухой” консервации). В этом варианте управления системой полный автоматизированный цикл передачи данных от системы на удаленный сервер и обратно после обработки составлял временной интервал от 5 до 10 мин (цикл обновления монитора диспетчера).

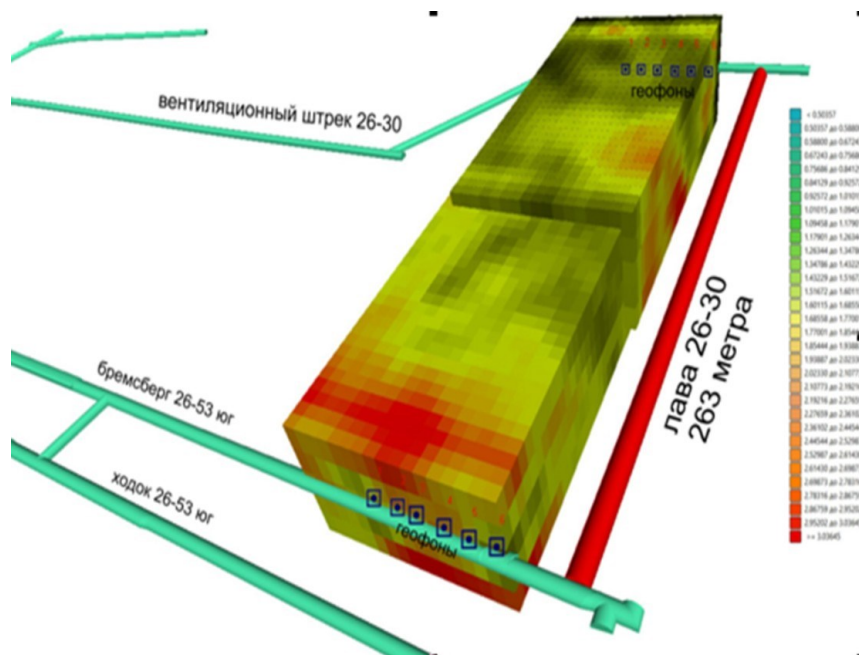


Рис. 4 – Составной куб текущего сейсмического контроля очистного забоя в регламентных оценках НДС (литры штыба), полученный от двух независимых систем МИКОН-ГЕО (шахта Есаульская, Кузбасс, 2014 г.)

На рис. 4 показан результат текущего контроля состояния горного массива в лаве шахты Есаульская (Кузбасс, 2014 г.). Особенностью этих испытаний являлось одновременное применение двух систем МИКОН-ГЕО, функционирующих независимым образом с двух сторон лавы с длиной очистного забоя 263 м. Получаемые в этом варианте два независимых параметрических куба в регламентных единицах напряженного состояния массива (литры штыба) вполне логично соединялись в один куб без заметного искажения в зоне сочленения.

Выводы и перспективы развития

Опыт технологического применения обсуждаемых методик и программно-технических средств системы “МИКОН-ГЕО” в подземном транспортном строительстве и разработке месторождений твердого сырья шахтным способом свидетельствует о соответствии целевых сейсмических параметров контроля состояния устойчивости горного массива регламенту требований безопасности подземных горных работ.

Доказана состоятельность теоретических и практических реализаций принципа совмещения активного и пассивного режимов регистрации сейсмических волновых полей различной природы, что обеспечивает формирование объективных критериев прогноза наступления опасного ГДЯ в конкретных горно-геологических условиях.

Перспективным направлением развития системы “МИКОН-ГЕО” является решение проблем интегрирования сейсмических параметров дистанционного контроля горного массива в ближней и дальней зонах ведения горных работ в многофункциональную систему безопасности шахт, что существенно повысит качество своевременного прогноза риска развития опасных гео- и газодинамических явлений.

Литература

1. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1994. – 381 с.
2. Лапин С.Э. Особенности проектирования систем контроля и прогноза газодинамических явлений для опасных производственных объектов / С.Э. Лапин, А.В. Вильгельм, В.Б. Писецкий // Безопасность труда в промышленности. – 2014. - № 3.
3. Biot M.A. Mechanics of incremental deformations. - New York: GU, 1965. – 430 p.
4. Прогноз устойчивости горного массива на основе метода сейсмической локализации в процессах строительства подземных сооружений / В.Б. Писецкий, В.В. Власов, В.П. Черепанов, И.В. Абатурова, А.Э. Зудилин, Ю.В. Патрушев, А.В. Александрова // EAGE, “Инженерная геофизика 2014”, Геленджик.-2014. “Инженерные изыскания”. ПНИИС.– 2014. – № 7. – С. 46 - 51.