



**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ  
С НАРУШЕНИЯМИ СПЛОШНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРЯМОГО СДВИГА  
ПРИ ПОСТОЯННОЙ НОРМАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ**

**О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: usoltseva57@mail.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Проведены испытания на образцах с нарушениями сплошности из искусственного геоматериала (бетонно-песчаной смеси) с треугольным профилем шероховатости поверхностей при трех значениях нормальной сжимающей нагрузки: 0.5, 0.9, 1.2 МПа и сдвиговом нагружении с граничным условием “постоянная нормальная жесткость”. Определены закономерности деформирования на каждой стадии диаграмм нагружения: линейной, нелинейной, при пиковой нагрузке и стадии остаточной прочности. Построены эмпирические зависимости предельного касательного напряжения от нормального напряжения при различных значениях шероховатости.

*Прочность, сдвиг, напряжение, деформация, нарушение сплошности*

**LABORATORY MODELING OF DEFORMATION OF SAMPLES WITH DISCONTINUITY  
UNDER DIRECT SHEAR IN CONSTANT NORMAL STIFFNESS CONDITIONS**

**O. M. Usol'tseva, P. A. Tsoi, and V. N. Semenov**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
E-mail: usoltseva57@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

This study presents tests of samples with discontinuity made of artificial geomaterial (concrete-sand mixture) having triangular profile of surface roughness under shear loading with the boundary “constant normal stiffness” condition, with three values of normal compressive load: 0.5, 0.9, and 1.2 MPa. The patterns of deformation were determined at each stage of loading diagrams: linear, nonlinear, peak load and residual strength. The empirical dependences of the ultimate shear stress on normal stress were constructed for different values of roughness.

*Strength, shear, stress, strain, discontinuity*

Механическое поведение массива горной породы определяется не только свойствами ненарушенной породы, но даже в большей степени механическими и геометрическими свойствами нарушений сплошности. Термин “нарушение сплошности” относится к любой поверхности ослабления в массиве с очень слабой прочностью на разрыв. Обзор литературы за последние годы показывает, что имеется большое количество работ, посвященных исследованию физико-механических свойств нарушений сплошности при сдвиговом деформировании. На эквивалентных материалах и горных породах изучалась эволюция зон сдвига, были установлены качественные закономерности их расположения, ориентации различных систем трещин относительно магистральной трещины, изучено влияние всевозможных факторов (различных модельных материалов, скорости нагружения, влажности, граничных условиях и т. д.) на деформационно-прочностные характеристики нарушений сплошности [1 – 14].

Представленная работа направлена на продолжение таких исследований. За основу методики лабораторного определения сопротивления сдвигу нарушений сплошности горных пород взята обновленная версия стандарта International Society for Rock Mechanics (ISRM) ASTM D 5607-08, опубликованная в [15, 16]. В общем случае методика включает в себе требования к проведению испытаний при нагружении прямым сдвигом образцов горных пород, как сплошных, имеющих невысокую прочность, так и содержащих нарушения сплошности, при двух случаях граничных условий: постоянная нормальная, действующая в направлении, перпендикулярном сдвиговому усилию (условие ПНН) и постоянная нормальная жесткость (ПНЖ). При испытаниях с граничным условием ПНН фактически определяется не прочность нарушения сплошности на сдвиг, а его сопротивление сдвигу при фиксированном уровне нормальной нагрузки. Это условие применимо для таких случаев как открытые скальные склоны. Однако для нарушений сплошности, имеющих шероховатую поверхность, сдвиг приводит к дилатансии, так как одна шероховатость поверхности перекрывает другую, и если окружающая масса горных пород неспособна деформироваться в достаточной степени, то при сдвиге неизбежно происходит увеличение нормального напряжения. Такой тип сдвига соответствует граничным условиям постоянной нормальной жесткости и подходит для описания поведения глубоких подземных выработок или скальных укрепленных склонов.

В данном исследовании рассматриваются испытания горных пород с нарушениями сплошности при сдвиге с граничным условием ПНЖ. Специальная установка на базе сервогидравлического пресса Instron 8802 для испытаний образцов горных пород и геоматериалов в условиях прямого сдвига при условии ПНН [17] была доукомплектована оборудованием для проведения сдвига в условиях ПНЖ. Функциональная схема установки показана на рис. 1.

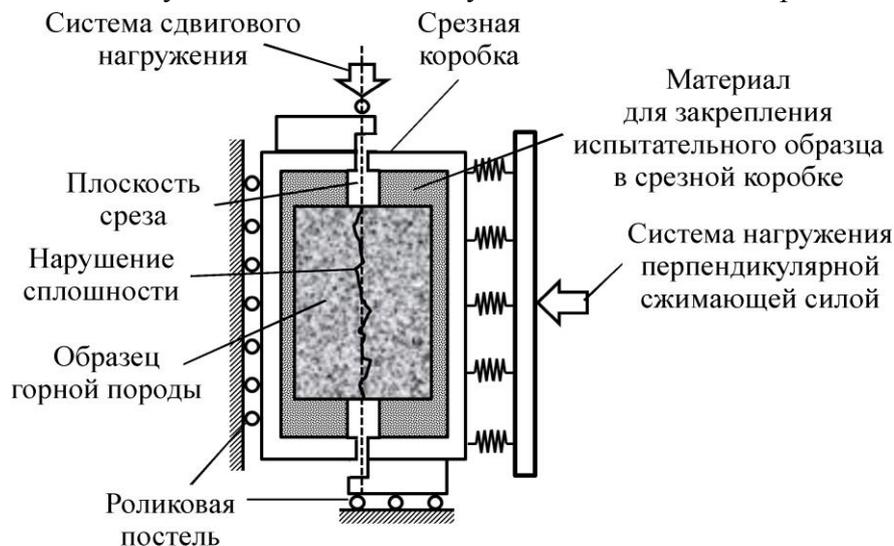


Рис. 1. Функциональная схема установки для испытаний на прямой сдвиг

Нормальное (прижимающее) усилие создавалось гидравлическим цилиндром, усилие контролировалось манометром и электронным датчиком давления. Нормальное перемещение (в направлении, перпендикулярном сдвиговому усилию) регистрировалось с помощью четырех датчиков Solartron DP10S [6], расположенных в плоскости, перпендикулярной нормальному усилию. Сдвиговое перемещение задавалось траверсой пресса Instron 8802. В процессе испытания непрерывно фиксировались и записывались в компьютерный файл сдвиговое усилие, сдвиговое перемещение (перемещение траверсы пресса), нормальное усилие и соответствующее ему перемещение. Жесткость комплекта пружин составляла  $K = 6$  кН/мм.

Испытания проводились на образцах с нарушениями сплошности из искусственного модельного геоматериала (бетонно-песчаной смеси) с заданным треугольным профилем шероховатости. Искусственный материал представлял собой смесь из цемента, песка в пропорции

1:4 по весу. Такие образцы были изготовлены для получения повторяемости данных при одних и тех же условиях эксперимента и определения закономерностей изменения деформационно-прочностных свойств. Смесь для изготовления образцов заливалась в специальные формы из металла с изолирующей пленкой, в верхнюю часть формы вдавливалась металлические специальные пластины с заданными треугольными профилями шероховатости. Выбраны три значения профиля шероховатости: амплитуда  $h = 4, 8$  и  $10$  мм, угол профиля  $45^\circ$ . Фотографии образцов приведены на рис. 2.

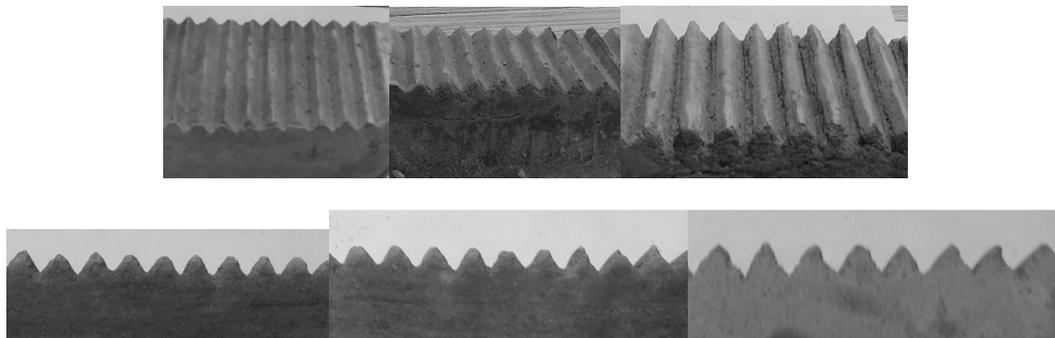


Рис. 2. Фотографии профиля образцов из бетонно-песчаной смеси:  $h = 4, 8, 10$  мм

Предварительно изготовлены цилиндрические образцы диаметром 30 мм, длиной 60 мм для испытаний на одноосное сжатие и образцы диаметром 30 мм, длиной 30 мм для испытаний на растяжение. При одноосном сжатии предел прочности составил 32.8 МПа, модуль Юнга — 8.3 ГПа, коэффициент Пуассона — 0.175, при растяжении предел прочности — 6.3 МПа.

Образцы испытывались при граничных условиях ПНЖ и варьировании трех значений нормальной сжимающей нагрузки: 0.5, 0.9, 1.2 МПа и трех значений шероховатости:  $h = 4, 8, 10$  мм. Каждый тип испытания проводился на двух образцах по следующей программе: сначала прикладывалась нормальная нагрузка, перпендикулярная усилию сдвига, со скоростью 0.01 МПа/с пока не достигла заданного значения нормального напряжения. Смещение сдвига происходило с постоянной скоростью 0.2 мм/мин и увеличивалось до значения предельного или остаточного касательного напряжения. Частота записи составляла 10 Гц. С использованием указанных данных построены зависимости касательного и нормального напряжения от касательного и нормального смещения. Дана оценка параметров прочности заданного нарушения сплошности по критерию прочности Кулона–Мора:  $\tau = c + \text{tg}\varphi$ , где  $c$  — сцепление;  $\text{tg}\varphi$  — коэффициент трения;  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

На рис. 3а, в, д показаны осредненные по двум испытаниям характерные зависимости: касательное напряжение–сдвиговое перемещение, нормальное напряжение–сдвиговое перемещение, и нормальное перемещение–сдвиговое перемещение для образцов с шероховатостью поверхности  $h = 8$  мм при различных значениях нормальной сжимающей нагрузки  $\sigma = 0.5, 0.9, 1.2$  МПа. Из рис. 3а видно, что с увеличением  $\sigma$  предельное сдвиговое напряжение возрастает, причем процесс сдвигового деформирования нарушения сплошности можно условно разделить на три стадии: на первой при небольших значениях сдвигового перемещения (0.5–1 мм) наблюдается практически линейный участок, вторая стадия — нелинейный участок (при более высоких значениях сдвигового перемещения — до 1.5 мм), третья стадия — касательное напряжение достигает “пикового” значения, в некоторых случаях наблюдается стадия остаточной прочности (при сдвиговых деформациях более 2–3 мм). Величина “модуля сдвига” на первой стадии деформирования тем больше, чем больше значение нормальной сжимающей силы. На рис. 3в видно, что при граничных условиях ПНЖ нормальное сжимающее напряжение имеет тенденцию увеличиваться с ростом касательного напряжения, причем из трех экспериментов

с различными значениями  $\sigma$  можно заключить, что с увеличением первоначального значения нормального напряжения его относительный прирост уменьшается. Эти результаты хорошо коррелируют с данными на рис. 3д, где видно, что нормальное перемещение увеличивается в процессе эксперимента тем больше, чем меньше значение нормальной сжимающей силы.

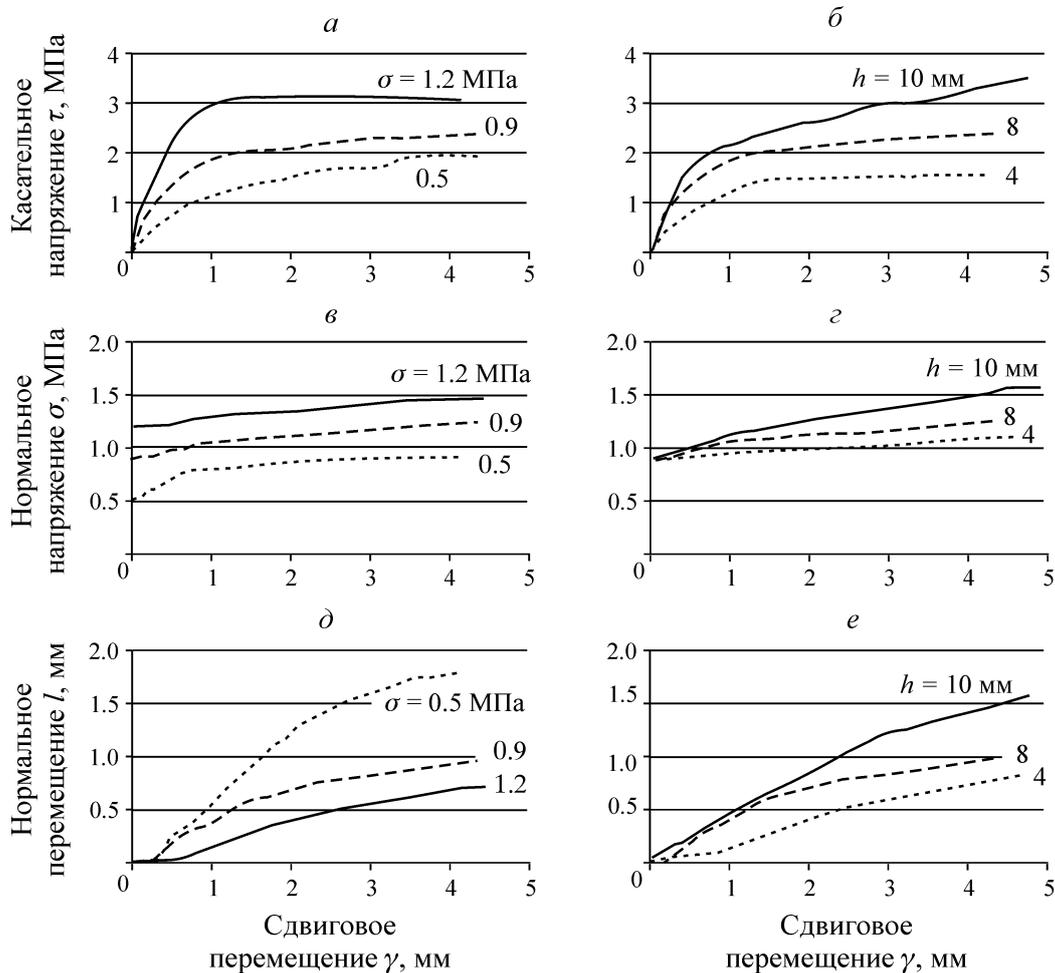


Рис. 3. Осредненные зависимости по данным двух экспериментов на сдвиг при граничном условии ПНЖ при значениях нормальной сжимающей нагрузки, МПа: а — 0.5; в — 0.9; д — 1.2 для образцов с шероховатостью  $h = 8$  мм; то же для образцов с нормальной сжимающей нагрузкой 0.9 МПа и шероховатостью, мм: б — 4; г — 8; е — 10

На рис. 3б, г, е приведены осредненные по данным двух экспериментов зависимости касательное напряжение–сдвиговое перемещение, нормальное напряжение–сдвиговое перемещение, нормальное перемещение–сдвиговое перемещение для испытаний с нормальной сжимающей нагрузкой 0.9 МПа для образцов с различными значениями шероховатости поверхности  $h = 4, 8, 10$  мм. Анализ влияния шероховатости показывает, что с увеличением высоты пиков  $h$  увеличивается длина линейного участка на кривой касательное напряжение–сдвиговое перемещение, модуль сдвига этой кривой “предельное” касательное напряжение (рис. 3б). Кроме того, возрастает значение относительного прироста нормального напряжения в процессе сдвига (рис. 3г), а также нормального перемещения, т. е. расширение нарушения сплошности в процессе его сдвигового деформирования (рис. 3д).

Следует отметить, что на зависимостях касательное напряжение–сдвиговое перемещение пиковое напряжение не является ярко выраженным. За него можно условно принять точку, где появляется тенденция уменьшения модуля данной кривой и начинается существенный рост перемещения сдвига, т. е. процесс деформирования становится нестабильным.

На рис. 4 приведены эмпирические зависимости предельных касательных напряжений от  $\sigma = 0.5, 0.9, 1.2$  МПа для образцов из бетонно-песчаной смеси при шероховатости поверхности  $h = 4, 8, 10$  мм. Видно, что сцепление возрастает с увеличением  $h$  практически по линейному закону, для угла внутреннего трения не удалось обнаружить какую-либо зависимость от указанного параметра.

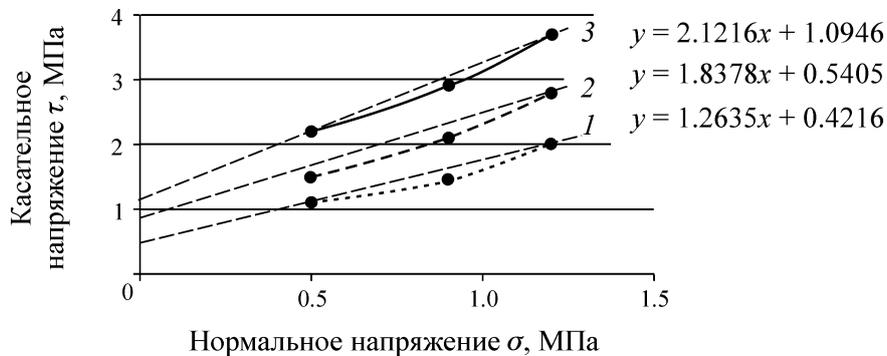


Рис. 4. Предельное касательное напряжение для образцов из бетонно-песчаной смеси при  $\sigma = 0.5, 0.9, 1.2$  МПа и шероховатости поверхности  $h$ , мм: 1 — 4, 2 — 8, 3 — 10

## ВЫВОДЫ

Проведена серия экспериментов при сдвиговом деформировании на образцах с нарушениями сплошности из искусственного геоматериала — бетонно-песчаной смеси с треугольным профилем поверхности:  $h = 4, 8, 10$  мм при граничных условиях ПНЖ и нормальной сжимающей нагрузке 0.5; 0.9 МПа; 1.2 МПа. На основе анализа зависимостей между регистрируемыми в процессе деформирования параметрами: касательное напряжение, нормальное напряжение, сдвиговое перемещение, нормальное перемещение, установлены следующие закономерности. Процесс сдвигового деформирования нарушений сплошности можно условно разделить на три стадии: линейный участок зависимости касательное напряжение – сдвиговое перемещение, нелинейный участок данной зависимости; третья стадия — касательное напряжение достигает пикового значения, в некоторых случаях наблюдается стадия остаточной прочности. Величина модуля сдвига на первой стадии деформирования тем больше, чем больше значение нормальной сжимающей силы, с увеличением которой предельное сдвиговое напряжение возрастает. Нормальное сжимающее напряжение имеет тенденцию увеличиваться с ростом касательного напряжения. С увеличением высоты пиков  $h$  растет длина линейного участка на кривой касательное напряжение – сдвиговое перемещение, модуль сдвига этой кривой и предельное касательное напряжение, возрастает также значение относительного прироста нормального напряжения и нормального перемещения, т. е. расширение нарушения сплошности. Построены эмпирические зависимости предельного касательного напряжения от нормального напряжения при различных значениях шероховатости. Показано, что сцепление возрастает с увеличением шероховатости практически по линейному закону. Для угла внутреннего трения не удалось обнаружить какую-либо зависимость от указанного параметра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Atapour H. and Moosavi M.** The Influence of Shearing Velocity on Shear Behavior of Artificial Joints, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, no. 5, pp. 1745–1761. doi.org/10.1007/s00603-013-0481-9.

2. **Bokun A. N.** Patterns of education and features of the structure of horizontal shear zones (according to the results of physical modeling). *Tectonophysics and topical issues of Earth sciences, Materials reports Russian. Conf.*, 2009, vol. 1, Moscow, Institute of Physics of the Earth, RAS. (in Russian) [**Бокун А. Н.** Закономерности образования и особенности строения зон горизонтального сдвига (по результатам физического моделирования) // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы Всерос. конф.*, Т. 1. — М.: Институт физики Земли РАН, 2009. — 241 с.]
3. **Gao Y. and Wong L. N. Y.** A Modified Correlation between Roughness Parameter  $Z_2$  and the JRC. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, no. 1, pp. 387–396. Doi.org/10.1007/s00603-013-0505-5.
4. **Hencher S. R. and Richards L. R.** Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, no. 3, pp. 883–905. Doi.org/10.1007/s00603-014-0633-6.
5. **Indraratna B., Thirukumar S., Brown E. T., and Zhu S. P.** Modelling the Shear Behaviour of Rock Joints with Asperity Damage Under Constant Normal Stiffness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, no. 1, pp. 179–195. Doi.org/10.1007/s00603-014-0556-2.
6. **Jang H. S. and Jang B. A.** New Method for Shear Strength Determination of Unfilled, Unweathered Rock Joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, no. 4, pp. 1515–1534. Doi.org/10.1007/s00603-014-0660-3.
7. **Mirzaghobanali A., Nemcik J., and Aziz N.** Effects of Cyclic Loading on the Shear Behaviour of Infilled Rock Joints Under Constant Normal Stiffness Conditions, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, no. 4, pp. 1373–1391. Doi.org/10.1007/s00603-013-0452-1.
8. **Mohd-Nordin M., Song K., Cho G., and Mohamed Z.** Long-Wavelength Elastic Wave Propagation Across Naturally Fractured Rock Masses, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, no. 2, pp. 561–573. Doi.org/10.1007/s00603-013-0448-x.
9. **Moradian Z. A., Ballivy G., and Rivard P.** Correlating acoustic emission sources with damaged zones during direct shear test of rock joints, *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, vol. 49, no. 6, pp. 710–718. Doi: 10.1139/T2012-029.
10. **Vergara M., Kudella P., and Triantafyllidis T.** Large Scale Tests on Jointed and Bedded Rocks Under Multi-Stage Triaxial Compression and Direct Shear, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, iss. 1, pp. 75–92. Doi.org/10.1007/s00603-013-0541-1.
11. **Jiang Y., Xiao J., Tanabashi Y., and Mizokami T.** Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, vol. 41, no. 2, pp. 275–286. Doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2003.08.004.
12. **Shrivastava A. K. and Rao K. S.** Shear Behaviour of Rock Joints Under CNL and CNS Boundary Conditions. *Geotech and Geol Ing*, 2015. Doi 10.1007/s10706-015-9896-2.
15. **ASTM D 5607-9502.** Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force.
16. **Muralha J., Grasselli G., Tatone B., Blumel M., Yuqing P., and Chryssanthakis J.** ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, no. 1, pp. 291–302.
17. **Usol'tseva O., Tsoi P., and Semenov V.** Investigation of strength and microseismic emission characteristics of rock joints under shear loading, 18th International multidisciplinary scientific geoconference, SGEM 2018: conf. proc., Bulgaria, Albena, 2 July–8 July 2018, Sofia: Stef 92 Technology Ltd., 2018, vol. 18, no. 1.3, pp. 521–528. DOI: 10.5593/sgem2018/1.3/S03.067.