

УДК 622.831 : 539.37

Шеметов Роман Сергеевич

горный инженер,
инженер лаборатории геомеханики
и инженерных исследований,
ООО «Полюс Проект»,
660049, г. Красноярск,
ул. Карла Маркса, 21-196
e-mail: shemetovrs@yandex.ru

**МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА
ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И
СООРУЖЕНИЙ В РЕГИОНАХ
С СОВРЕМЕННЫМИ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ДВИЖЕНИЯМИ***Аннотация:*

В статье рассмотрены результаты эмпирических исследований геодинамических движений. С помощью численного моделирования и расчетов методом конечных элементов обоснована опасность воздействия геодинамических движений на сложноконструктивные сооружения. Исходя из этой опасности подобрана такая система мониторинга деформаций, которая позволит с высокой достоверностью и своевременностью оценить степень воздействия геодинамических движений на элементы сооружений.

Ключевые слова: современные геодинамические движения, численное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, мониторинг деформаций сооружений

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.096

Shemetov Roman S.

mining engineer,
the engineer of the laboratory of geo-mechanics
and engineering research «PolyusProject»,
660049, Krasnoyarsk,
21-196 Karl Marx st.
e-mail: shemetovrs@yandex.ru

**THE METHOD FOR MONITORING
DEFORMATIONS OF BUILDINGS
AND STRUCTURES IN REGIONS
OF UP-TO-DATE GEO-DYNAMIC
MOVEMENTS***Abstract:*

In the article the results of geo-dynamic movement empirical studies are considered. With the help of numerical simulation and calculations by way of finite elements the risk of to geodinamics movements impact on close connection structures is grounded. Based on this risk such monitoring system is selected, that allows with high reliability and in proper time to assess the impact of geo-dynamic movements in the elements of structures.

Key words: up-to-date geo-dynamic movements, numerical simulation, finite element method, stressed-deformed state, monitoring of structures' deformations

Введение

В настоящее время наличие геодинамических движений подтверждается различными исследователями на различных континентах земного шара. Эмпирическим путем выявлены различные формы и виды движения земной коры. По времени эти движения делят на вековые (медленные), сейсмические (быстрые) и короткопериодические колебания. Движения земной поверхности протекают повсеместно и могут происходить как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях.

В середине 50-х годов двадцатого столетия была составлена карта перемещений земной коры европейской части бывшего СССР, на которой подробно указаны величины поднятий и оседаний областей от территории Урала до Карпат. Например, территории Большого и Малого Кавказа испытывают сводовое поднятие, а территории Предкавказья – опускание. Берег Азовского моря поднимается со скоростью 2 мм/год, а по реке Терек наблюдается интенсивное опускание. За рубежом также ведутся наблюдения за движениями земной коры. На территории Европы и Америки выявлены оседания и поднятие материковых платформ с различными величинами.

Например, в Западной Гренландии и на острове Шпицберген зафиксированы поднятия со скоростями 14 и 30 мм/год, соответственно. А на территории Нидерландов или Италии наблюдаются опускания земной поверхности со скоростями 2 – 3 мм/год (а местами и до 10 мм/год). В Северной Америке центр канадского щита поднимается со скоростью до 100 мм/год, а Калифорнийское побережье опускается со скоростью до 300

мм/год. Также выявлены и горизонтальные движения литосферы. Например, в районе разлома Сан-Андреас (США, Калифорния) обнаружены горизонтальные смещения величиной 10 – 30 мм/год. При этом разные стороны разлома движутся в противоположном друг от друга направлении. Вулканы Павинихан и Талагалель, расположенные на Малайском архипелаге, сместились в направлении юга и юго-востока, соответственно, на 120 и 200 см за 5 лет в период с 1931 по 1936 г. Все вышеприведенные примеры подтверждают повсеместные движения земной коры на планете Земля. Причем движения происходят как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

В связи с тем, что современные движения земной коры характеризуются попеременным поднятием и опусканием, а горизонтальные движения меняют свое направление, напряжения в земной коре также меняют свой знак и интенсивность. Таким образом, напряжения, возникающие в земной коре, могут быть сжимающими, растягивающими и скалывающими [1].

Все вышеописанные смещения и возникающие от их воздействия напряжения могут вызывать катастрофические последствия для человечества. Результатом их действия могут быть техногенные аварии различного масштаба, по причине которых возможны разрушения зданий, сооружений различного назначения. В лучшем случае эти аварии ограничиваются окончанием эксплуатации сооружений, а в худшем – уносят человеческие жизни.

В этом отношении гораздо большую опасность представляют собой именно горизонтальные смещения. Они зачастую по своей величине превосходят вертикальные и также могут менять свое направление. Вследствие этого, в земной коре, а также в сооружениях, расположенных на территории, на которой происходят смещения, возникают различного характера напряжения, которые могут быть опасны для дальнейшей эксплуатации этих сооружений.

В связи с этим автором разработана методика по мониторингу деформаций зданий и сооружений под влиянием геодинамических движений земной поверхности.

Построение трехмерной численной модели и разработка методики геотехнического мониторинга

Цель разрабатываемой методики – учесть в равной степени влияние вертикальных и горизонтальных смещений земной коры на деформацию сооружений. В настоящее время разработано огромное количество применяемых методик мониторинга деформаций, поэтому основной задачей стало объединение действующих методик в одну, позволяющую объективно оценить вертикальные и горизонтальные смещения, происходящие в сооружении.

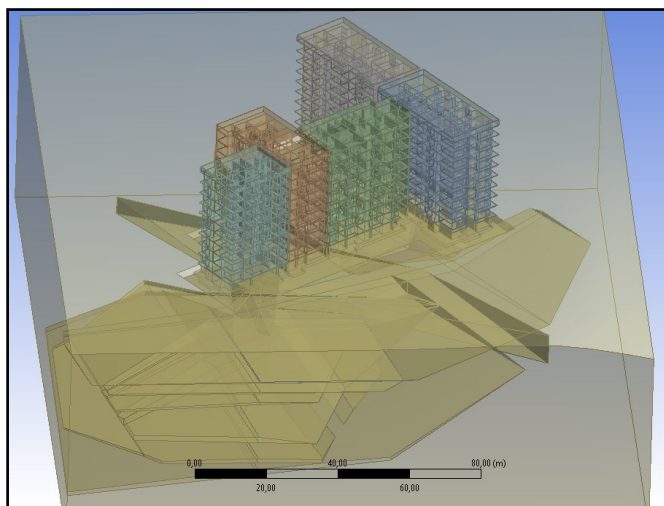


Рис. 1 – Трехмерная численная модель исследуемого объекта

Для оценки перераспределения напряжений и возникновения деформаций в сооружениях под воздействием геодинамических движений была построена численная трехмерная модель, позволяющая произвести подобный анализ методом конечных элементов. По данным инженерно-геологических разрезов в модели была учтена геологическая характеристика исследуемого участка. В соответствии с проектом были построены здания, располагаемые на данной территории (рис. 1). Модель была построена в программном комплексе AutoCAD с последующим экспортом в Ansys. Физико-механические свойства грунтов были взяты из результатов инженерно-геологических исследований объекта (табл. 1).

Свойства, приведенные в табл. 1 заданы в программном комплексе Ansys для дальнейших расчетов.

Таблица 1

Физико-механические свойства грунтов [2]

№ ИГЭ	Характеристики грунтов	Е _{ест} , МПа	С _п , кПа	φ _п , град
1	Суглинок тяжелый пылеватый, полутвердой консистенции	11,5*	16	22
2	Глина легкая, пылеватая, тугопластичная, ненабухающая	9,6*	20	24
3	Галечниковый грунт с супесчаным пластичным заполнителем до 19,3 %, насыщенный водой, неветрелый, очень прочный	19,2	2,4	29,7
4	Галечниковый грунт с суглинистым тугопластичным заполнителем до 32,4 %, насыщенный водой, неветрелый, очень прочный	21,2	-	-
5*	Галечниковый грунт с песчаным заполнителем более 13,6 %, очень прочный, неветрелый, насыщенный водой	25,0	8,0	34
6	Глина легкая, пылеватая, мягкопластичная, с линзами суглинка мягкопластичного	5,0	6	13
7	Супесь пылеватая, пластичной консистенции	8,0	6	17
8	Песок крупный, насыщенный водой		2	31

Построенная модель была разбита на сетку конечных элементов, представленных в форме тетраэдров. Получилось примерно 730000 элементов с 1300000 узлов (рис. 2).

Сгущение элементов в большей степени прослеживается непосредственно в самих сооружениях, так как именно в них перераспределение поля напряжений представляет наибольший интерес.

После построения конечно-элементной сетки были заданы нагрузки в модели. На первом этапе рассчитывалась статическая модель. На объект исследований действовала только сила гравитации [3]. При расчетах получены следующие данные:

- Сжимающие нормальные вертикальные напряжения достигают максимум 5 МПа. Эти значения можно наблюдать в нижних частях здания (рис. 3, 4).
- Область повышенных сжимающих напряжений достигает третьего этажа здания и постепенно угасает, распространяясь к вершине сооружения, что вполне логично и ожидаемо.

Области растяжений при данных расчетах не наблюдается.

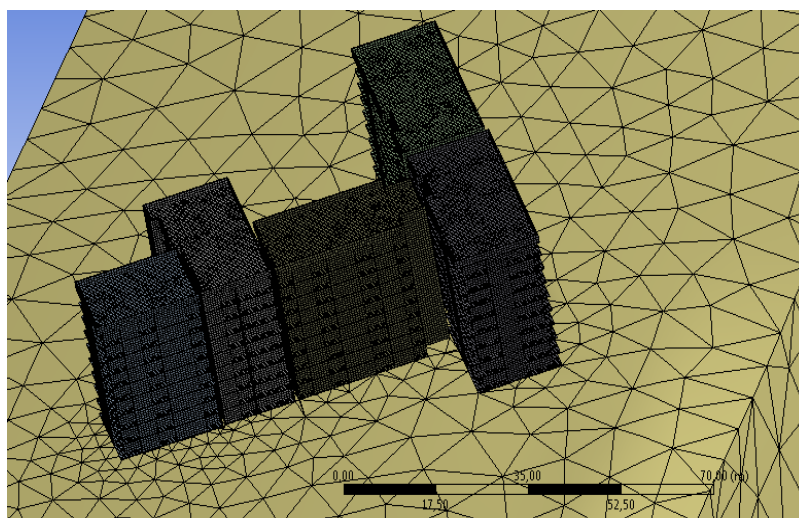


Рис. 2 – Конечно-элементная расчетная модель

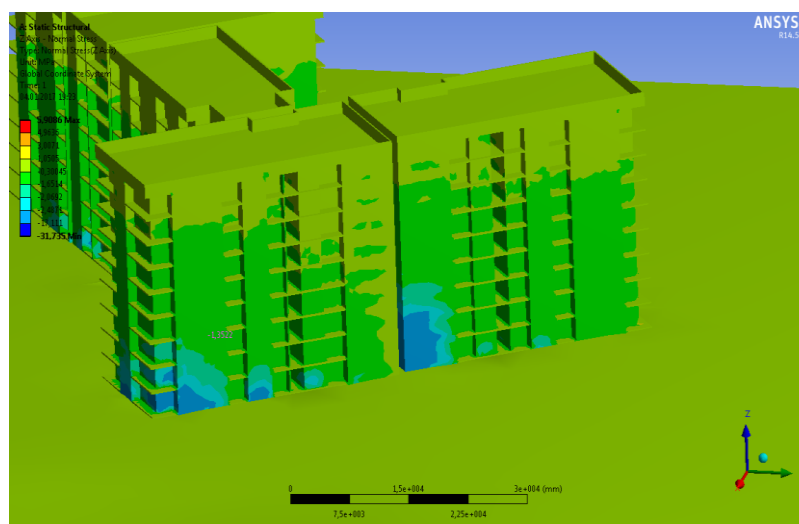


Рис. 3 – Распределение нормальных вертикальных напряжений в статической модели, вид с востока

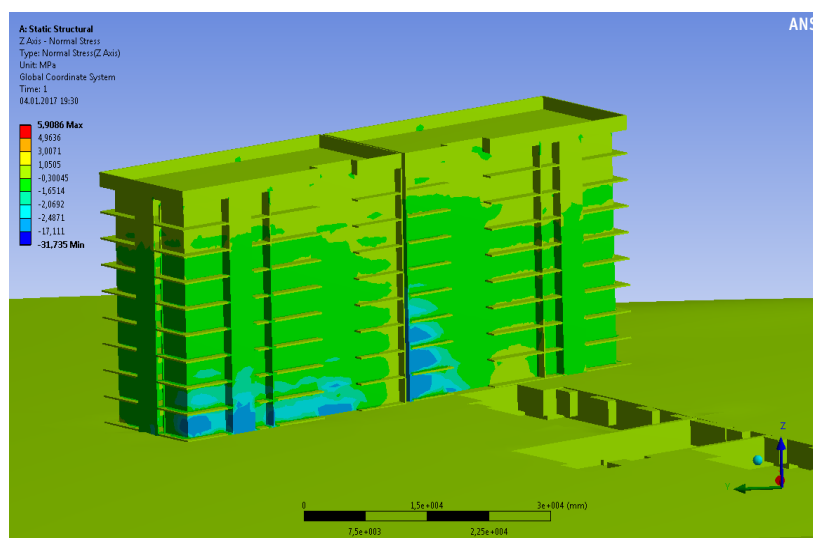


Рис. 4 – Распределение нормальных вертикальных напряжений в статической модели, вид с запада

На втором этапе рассматривалось перераспределение поля напряжений в динамике. На этом этапе в качестве нагрузок, помимо гравитационной составляющей, была задана также геодинамическая составляющая. Нагрузка была задана в виде сейсмической волны магнитудой 5 баллов. Для этого был сформирован волновой фронт [4], воздействующий на построенную модель с востока. Было выбрано именно это направление, так как в период строительства объекта с 2012 по 2014 г. в данном районе действительно произошло 2 или 3 землетрясения магнитудой около 5 баллов с эпицентром на востоке от нашей площадки, в Республике Абхазия [5]. Расстояние до эпицентра 100 км. Задняя стенка модели испытывает быстрое периодическое смещение, показанное на графике: сжатие на 15 см, затем растяжение. Период колебаний – 10 сек (рис. 5).

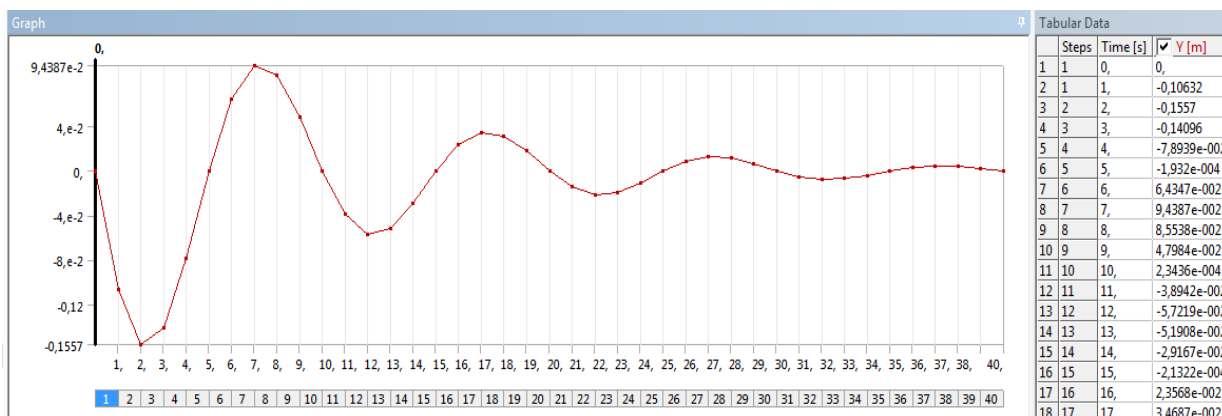


Рис. 5 – График волнового фронта, воздействующий на модель [4]

В результате воздействия геодинамической нагрузки нормальные вертикальные сжимающие напряжения возросли до 14 МПа, а область их распространения увеличилась до 6-го этажа на стыках зданий и до 2 – 3-го в других частях. Одновременно с этим на стыках сооружений появилась зона растягивающих напряжений величиной до 4 МПа, что является наиболее опасным воздействием, так как предел прочности бетона на растяжение намного меньше предела прочности на сжатие (рис. 6, 7). Растягивающие напряжения в большей мере могут привести к возникновению деформаций в конструкциях сооружений.

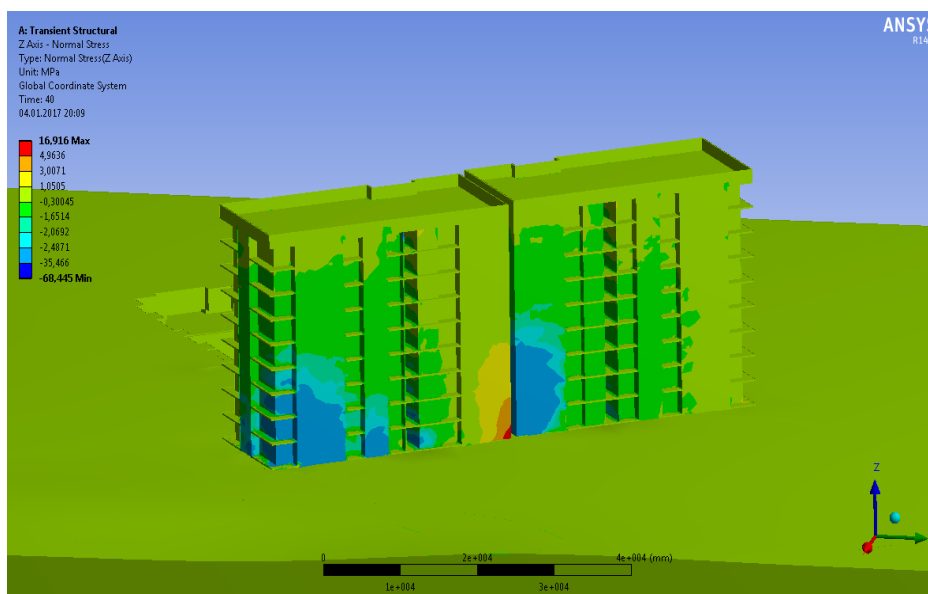


Рис. 6 – Эпюры напряжений после воздействия геодинамической нагрузки, вид с востока

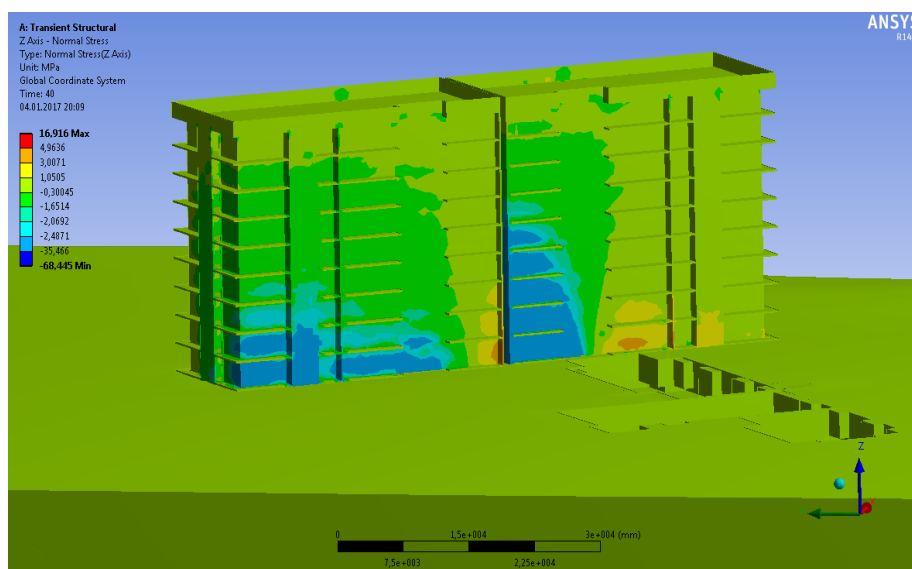


Рис. 7 – Эпюры напряжений после воздействия геодинамической нагрузки, вид с запада

С учетом полученных результатов и потенциальной вероятности возникновения растягивающих и повышенных сжимающих напряжений в сооружениях предложена система мониторинга, позволяющая в короткое время и максимально точно отследить смещения конструктивных элементов здания. Она представляет собой совокупность современных методик измерений, достаточно широко применяющихся в настоящее время на горных и промышленных предприятиях.

Первая часть геотехнического мониторинга представляет собой проведение высокоточного нивелирования с помощью современных цифровых нивелиров. Нивелирные марки предполагается располагать в частях сооружений, потенциально подверженных максимальным сжимающим и растягивающим напряжениям по результатам расчетов трехмерной численной математической модели. Это позволит выявить с максимальной точностью вертикальную компоненту смещений.

Для проведения высокоточных измерений желательно, чтобы нивелир имел компенсатор. Точностные характеристики при выборе нивелира должны удовлетворять следующим требованиям: допустимая средняя квадратическая погрешность измерения превышения на 1 км двойного хода не должна превышать 0,3 мм для нивелиров с компенсатором и 0,5 мм для нивелиров с уровнем; увеличение зрительной трубы должно составлять не менее 40 крат; диаметр входного зрочка – не менее 48 мм [6].

Вторая часть предполагает собой развитие наблюдательной станции и проведение систематических измерений с помощью роботизированного тахеометра повышенной точности (не менее 1"). Марки необходимо располагать также в местах повышенных сжимающих и растягивающих напряжений. Этот вид измерений позволит выявить горизонтальную компоненту смещений.

Допускаемая средняя квадратическая погрешность измерения вертикального угла одним приемом должна составлять не более 3"; допускаемая средняя квадратическая погрешность измерения расстояния одним приемом не должна превышать $2+1 \cdot 10^{-6} D$, мм; допускаемая систематическая погрешность компенсации компенсатора при максимальном угле компенсации не должна превышать 0,5 значения максимальной допускаемой средней квадратической погрешности измерения вертикального угла одним приемом [7].

Третья часть проведения мониторинга предполагает развитие наблюдательной станции и проведение систематических наблюдений с помощью высокочастотных GNSS приемников. Станции съемки с помощью спутникового позиционирования предполагается располагать на кровле сооружения. Этот вид измерений, совместно с измерениями

с помощью роботизированного тахеометра, позволит выявить с достаточной точностью крен здания и потенциальную область деформирования сооружения.

Для спутникового позиционирования допускается применение следующих методов: метод точечного позиционирования, дифференциальный метод и относительный метод [8]. Какой бы метод ни использовался, наблюдения необходимо производить в режиме статики. В этом случае накопление данных измерений позволит максимально повысить точность результатов.

Заключение

В результате работы подтверждена и обоснована потенциальная опасность воздействия геодинамических движений на сложноконструктивные сооружения. Установлено, что под влиянием современных геодинамических движений возможно возникновение растягивающих сил и напряжений, наиболее опасных для эксплуатации объектов. Исходя из анализа перераспределения поля напряжений в сооружении рекомендованы наиболее приемлемые методики мониторинга деформаций. Эти методики должны проводиться систематически, и результаты исследований необходимо рассматривать в совокупности друг с другом. Предложенная методика вполне рабочая, что подтверждается результатами мониторинга деформаций, проводимого на горных предприятиях.

Литература

1. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н.П. Влох. - М.: Недра, 1994.
2. ООО «Росгеостройпроект» «Инженерно-геологические изыскания. Жилой квартал в микрорайоне «Веселое-Псоу», квартал 15 Адлерского района города Сочи», г. Ростов-на-Дону, 2011 г. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/446421274>
3. Шеметов Р.С. Обоснование выбора места расположения наблюдательной станции для проведения геомониторинга деформаций сооружений / Р.С. Шеметов, Ю.А. Филиппов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - № 10.
4. Малинникова О.Н. Расчет устойчивости оползневого склона на участке Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги с использованием программного комплекса Ansys / О.Н. Малинникова, Ю.А. Филиппов // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: 10-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов. – М.: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2013.
5. SCAPP онлайн-издание о городе Сочи «Как трясло Сочи: история землетрясений в городе-курорте» [Электронный ресурс] - Режим доступа: URL: <http://sochi.scapp.ru/scapp-gorod/istoriya-zemletryasenij-sochi/> (дата обращения 20.01.2017).
6. ГОСТ 10528-90 Межгосударственный стандарт. Нивелиры. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1990.
7. ГОСТ Р51774-2001 Тахеометры электронные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
8. Азаров Б.В. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений / Б.В. Азаров // Ползуновский вестник. - 2011. - № 1.