

УДК 550.831.015

**О ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ АМПЛИТУДНЫХ АНОМАЛИЙ  
СУТОЧНЫХ И ПОЛУСУТОЧНЫХ КОМПОНЕНТ  
ПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ  
С ТЕРМОУПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ  
(по данным наблюдений с гравиметрами CG-5 Autograv)**

*Э.В. Утёмов, Д.К. Нургалиев, А.Г. Харисов, Н.А. Матвеева*

**Аннотация**

В работе было показано, что существуют статистически значимые отклонения суточных и полусуточных приливных компонент наблюдаемых вариаций силы тяжести от теоретических, рассчитанных по формулам Лонгмана. Этот результат был получен в нескольких пунктах наблюдения в пределах Республики Татарстан в 2012 г. Для объяснения причин этого явления была выдвинута реологическая гипотеза.

**Ключевые слова:** лунно-солнечные приливы, числа Лява, гравиметрия, сила тяжести, термоупругость.

**Введение**

При обработке материалов высокоточных гравиметрических съемок вариации ускорения силы тяжести, вызванные приливами Луны и Солнца, обычно рассматриваются как помехи и от них стараются избавиться введением соответствующих поправок. Формулы, по которым рассчитываются такие поправки, основаны на статической теории, предложенной еще Ньютоном [1–3].

В рамках данной теории амплитуда приливных вариаций (амплитудный фактор) зависит от чисел Лява [4], которые, в свою очередь, определяются упругими свойствами недр Земли. В целом ряде работ [5–9] отмечается, что на приливные вариации силы тяжести оказывают влияние факторы, не учитываемые в расчетных формулах для поправок за приливы: термоупругость, реологические свойства недр, влияние океанических приливов, резонансные явления жидкого ядра Земли, собственные колебания Земли. Отметим, что современные высокоточные гравиметры с низким дрейфом и микрометрической точностью позволяют выявлять «тонкие» аномалии, связанные с подобными явлениями. Таким образом, данные наблюдений приливных вариаций силы тяжести и их аномалии в той или иной форме содержат уникальную информацию о неоднородностях, тектонике, структуре, реологических свойствах вещества земной коры, мантии, собственных колебаниях ядра.

Настоящая работа посвящена анализу аномалий отношения полусуточной составляющей амплитудного фактора к суточной по данным мониторинговых наблюдений в четырех пунктах в пределах Республики Татарстан (РТ). Интерес

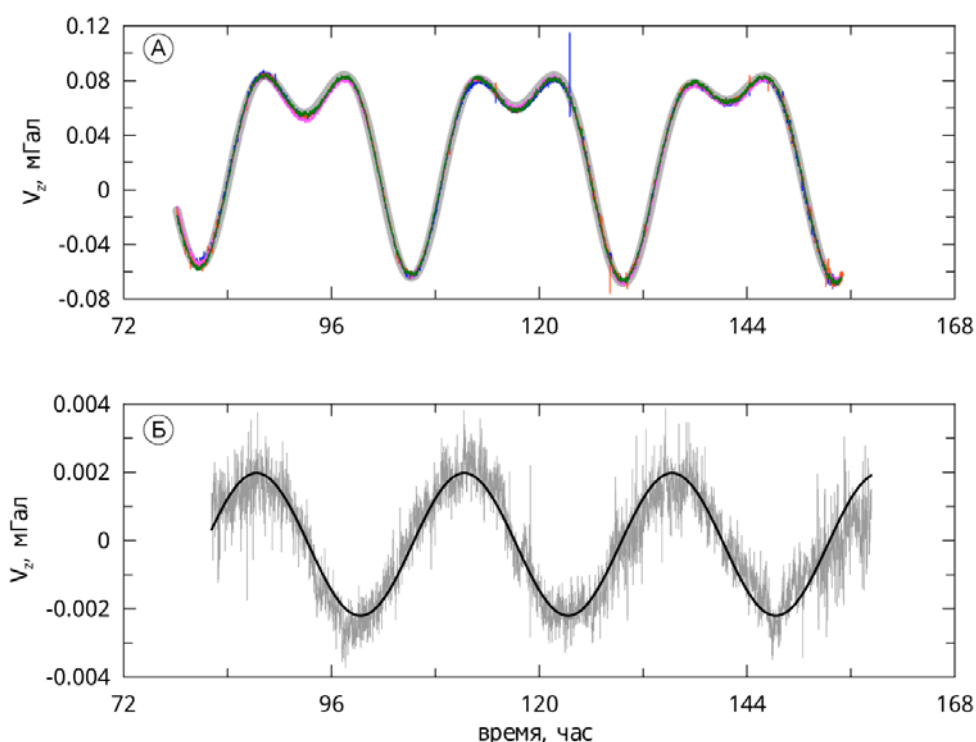


Рис. 1. Результаты гравиметрического мониторинга в здании Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета. А – наблюдаемая и теоретическая (серая линия) вариации силы тяжести. Б – разности средней наблюдаемой и теоретической вариаций силы тяжести (серая линия)

к данному параметру возник в связи результатами гравиметрического мониторинга в здании Института геологии и нефтегазовых технологий (ИГиНТ) Казанского федерального университета (КФУ). Измерения проводились четырьмя гравиметрами CG-5 Autograv (компания Scintrex Ltd., Канада) весной 2012 г. в течение нескольких суток (см. рис. 1).

На рис. 1, Б представлен график разности средней наблюдаемой и теоретической вариаций силы тяжести (серая линия). Как видно из рисунка, данный график имеет мощную гармоническую компоненту с суточным периодом. Данный факт невозможно объяснить недоучетом океанических приливов, поскольку такие приливы также имеют полусуточную компоненту. С другой стороны, этот результат можно рассматривать как аномалию отношения полусуточной приливной компоненты к суточной.

О существовании различий амплитудного фактора для приливных компонент с разным периодом известно еще из работ М.С. Молоденского [10], а также из других ранних работ [11, 12]. Однако наиболее геологически содержательной возможностью при исследовании аномалий данного параметра, на наш взгляд, является установление связи параметра с термоупругими свойствами вещества земной коры и мантии.

### 1. Математическая основа

В гравиметрии для введения поправок за приливные лунные и солнечные вариации силы тяжести используются расчетные формулы, основанные на статической теории. Так, например, в гравиметрах CG-5 Autograv используется алгоритм расчета приливных поправок, основанный на формулах Логнмана [2], которые, в свою очередь, опираются на статическую теорию приливов. В рамках данной теории предполагается, что и смещение поверхности, и возникающий из-за деформации Земли потенциал пропорциональны приливному потенциалу.

В первом грубом приближении для расчетов приливных поправок силы тяжести можно использовать модель твердой Земли:

$$Z_0 = 3G \frac{m}{s^3} R \left( \cos^2 \Psi - \frac{1}{3} \right), \quad (1)$$

где  $s$  – среднее расстояние от центра Земли до центра светила,  $m$  – масса светила,  $\Psi$  – зенитное расстояние (угол, образованный дугой на небесной сфере проекциями точки наблюдений и светила). Подставляя численные характеристики светил, получим:

$$\begin{aligned} Z_n &= 0.165\alpha \left( \cos^2 \Psi_n - \frac{1}{3} \right), \\ Z_c &= 0.076 \left( \cos^2 \Psi_c - \frac{1}{3} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь коэффициент  $\alpha$  вводится для учета изменения расстояния от Земли до Луны во времени.

Модель жесткой Земли не учитывает того факта, что в действительности фигура Земли под действием приливных сил деформируется. В модели эластичной Земли учитываются приливные деформации Земли: гравитационные эффекты, связанные с перераспределением масс в теле Земли и смещением точки наблюдений во время приливов. В этом случае имеем следующую формулу для каждого из светил:

$$Z = Z_0 + Z_1 + Z_2 = Z_0 \left( 1 - \frac{3}{2}k + q \right). \quad (3)$$

Здесь  $Z_0$  определяется формулой (1);  $Z_1$  и  $Z_2$  – поправки, учитывающие влияние перераспределения масс в теле Земли и смещение точки наблюдений соответственно; коэффициенты  $k$  и  $q$  – числа Лява, зависящие в конечном счете от твердости Земли. Если бы Земля была абсолютно твердой, то числа  $k$  и  $q$  были бы равны нулю. Таким образом, коэффициент

$$\delta = 1 + h - \frac{3}{2}k, \quad (4)$$

называемый амплитудным фактором, характеризует увеличение приливных вариаций силы тяжести вследствие деформации Земли.

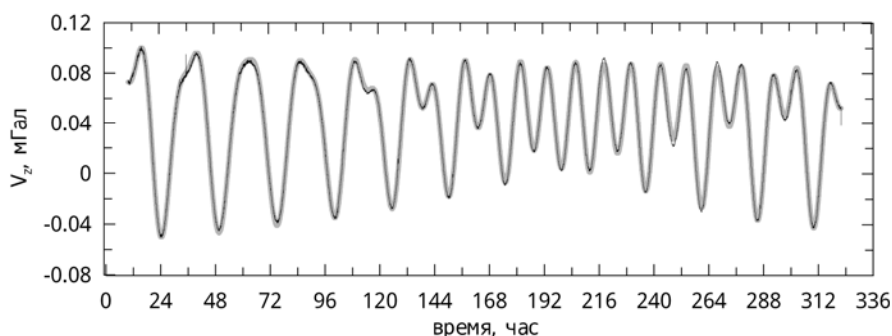


Рис. 2. Пример графика теоретических (широкая серая линия) и наблюдаемых приливных вариаций силы тяжести в здании ИГиНТ КФУ

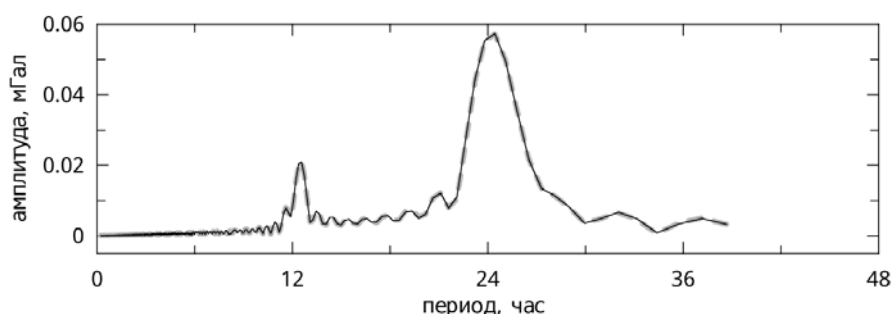


Рис. 3. Пример амплитудного спектра теоретической (пунктирная широкая линия) и наблюдаемой (тонкая черная линия) приливных вариаций силы тяжести (полигон № 2)

## 2. Методика измерений и обработка результатов

Измерения проводились гравиметрами CG-5 Autograv в течение 2011–2012 гг. циклами порядка  $5 \div 13$  сут в четырех пунктах в пределах РТ: в здании ИГиНТ КФУ, магнитной обсерватории КФУ, а также на полигонах № 1 (юго-восток РТ) и № 2 (северо-восток РТ). Даты наблюдений были приурочены к максимальным приливам (новолуние, полнолуние). Учёт дрейфа нуля-пункта производился с помощью аппроксимации остаточных (за вычетом теоретических поправок за приливы) аномалий силы тяжести полиномом 4-го порядка. На рис. 2 в качестве примера представлены графики теоретических вариаций (серая широкая кривая) и наблюдаемых вариаций (после учета дрейфа 0-пункта, тонкая черная кривая), измеренных в здании ИГиНТ КФУ.

По результатам измерений в спектральной области определялся параметр

$$\eta = \frac{A_{12}^T A_{24}^H}{A_{24}^T A_{12}^H}, \quad (5)$$

где  $A_{12}$  и  $A_{24}$  – средние значения амплитудного спектра  $A(\omega)$  приливных вариаций силы тяжести в центрированном окне в окрестностях полусуточных и суточных периодов (см. рис. 3). Ширина окна выбиралась таким образом, чтобы включить все основные приливные компоненты ( $O_1, P_1, Q_1, K_1$  и  $M_2, S_2, N_2, K_2$ ). Верхний индекс «Т» соответствует теоретическим вариациям, рассчитанным по формулам Лонгмана, верхний индекс «Н» – наблюдаемым вариациям.

Табл. 1

Пункт	Ши- рота	Дол- гота	Параметр $\eta$	Коли- чество изме- рений	Коли- чество прибо- ров	Продолжи- тельность измере- ний, сут
Здание ИГиНТ	55.820	49.103	$1.0382 \pm 0.00507$ (3.82%)	6	4	13
Магнитная обсерватория	55.930	48.740	$1.0362 \pm 0.0024$ (3.62%)	2	2	9
Полигон № 1	54.702	52.069	0.9708 (2.92%)	1	6	5
Полигон № 2	55.759	52.606	1.0600 (6.00%)	1	4	10

Параметр  $\eta$  показывает, во сколько раз теоретическое (рассчитанное в рамках статической теории по формулам Лонгмана) отношение полусуточной к суточной составляющей амплитудного фактора отличается от той же величины, полученной для наблюдаемых вариаций. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Шестикратные независимые измерения в здании ИГиНТ и двукратные в магнитной обсерватории КФУ свидетельствуют о статистической значимости результатов, поскольку среднеквадратический разброс полученных значений параметра  $\eta$  приблизительно на порядок (примерно в 7 раз в здании ИГиНТ и в 15 раз в магнитной обсерватории) меньше отклонений среднего значения этого же параметра от теоретической единицы (см. табл. 1). В процентном представлении эти отклонения составляют величины порядка 3–4%, за исключением значения отклонения параметра на полигоне № 2, где отклонение достигло 6%.

По полученным значениям  $\eta(x,y)$  была построена карта распределения данного параметра (см. рис. 4). Обнаруженные в результате гравиметрических наблюдений статистически значимые аномальные отклонения амплитуд суточных приливных компонент относительно полусуточных могут иметь интерпретацию в рамках сразу нескольких гипотез.

Так, например, в (различных) моделях Земли, рассмотренных в работах Джеффриса и Винсента [11], Пекериса [12], Молоденского [10], амплитудный фактор должен зависеть от величины периода приливной компоненты: амплитудный фактор должен быть минимален для компонент с периодом, близким к 24 ч (компонента  $K_1$ ), и увеличиваться в сторону компонент с более короткими или более длинными периодами.

Значения параметра  $\eta(x,y)$  отличаются для точек, расположенных на относительно малом расстоянии и это позволяет предположить влияние верхней части мантии или даже земной коры на наблюдаемое явление. По строению земной коры районы пунктов наблюдений значительно отличаются и мощностью земной коры [13], и строением осадочного чехла, например, полигон № 1 располагается вблизи нефтяного месторождения-гиганта, кроме того известные данные о распределении теплового потока на территории РТ [14] (см. рис. 5) свидетельствуют о значительном различии геотермических условий на пунктах. Сравнение карт, представленных на рис. 4 и 5, свидетельствует об их внешнем сходстве. На представленных картах повышенным значением соответствующего параметра выделяется Южно-татарский свод, при этом область Северо-татарского свода на обеих картах имеет пониженные значения.

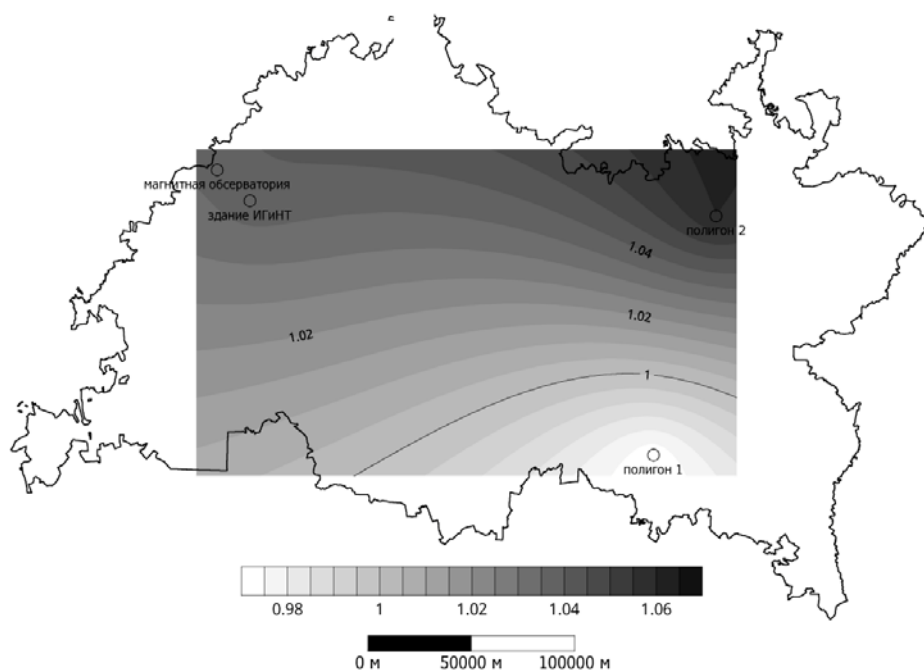


Рис. 4. Карта распределения параметра  $\eta$  (см. формулу (5) и табл. 1)

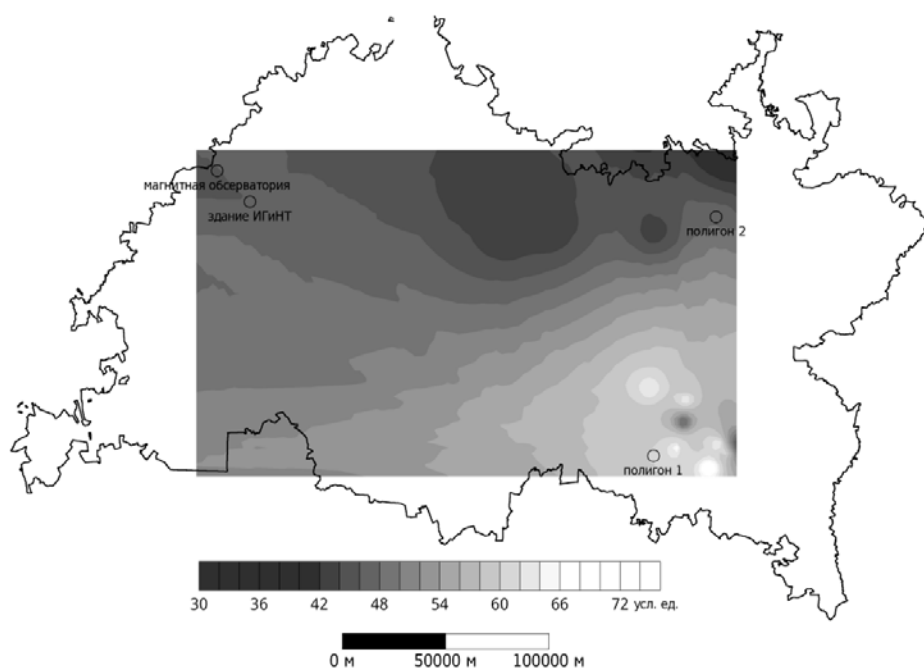


Рис. 5. Карта распределения теплового потока

Одна из наших гипотез существования аномалий отношения суточных и полусуточных компонент приливных вариаций силы тяжести заключается в существенном реологическом влиянии температуры земных недр на характер частотной зависимости амплитудного фактора от вынуждающей приливной силы,

в частности, подтверждением такой гипотезы и являются данные распределения теплового потока в районе исследований.

### Заключение

Представленные результаты обработки данных гравиметрических наблюдений свидетельствуют об обнаружении интересного явления – статистически значимом аномальном отклонении амплитуд суточных приливных компонент относительно полусуточных, при этом данные отклонения имеют выраженную пространственную изменчивость, которая может быть обусловлена различием упругих параметров как верхней части мантии, так и земной коры и даже осадочного чехла. Одной из гипотез является возможность влияния температуры на характер частотной зависимости амплитудного фактора от вынуждающей приливной силы.

В любом случае обнаруженное явление открывает новое направление исследований в, казалось бы, понятной области изучения земных приливов и может стать новым инструментом изучения земных недр.

Отметим, что изложенные результаты имеют предварительный характер, для подтверждения или опровержения гипотезы требуются как увеличение пунктов наблюдений, так и теоретическое обоснование гипотезы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 2010-218-01-192).

### Summary

*E.V. Utemov, D.K. Nurgaliev, A.G. Kharisov, N.A. Matveeva.* A Possible Relationship of Amplitude Anomalies in Diurnal and Semidiurnal Tidal Components of Gravity Variations to Thermoelastic Properties of the Earth's Crust as Observed Using Gravimeters CG-5 Autograv.

The paper shows that there are statistically significant deviations in the diurnal and semidiurnal tidal components of the observed gravity variations from the theoretical ones, calculated by Longman's formulas. This result has been obtained at several observation points within the Republic of Tatarstan in 2012. To describe the genesis of this phenomenon, a rheological hypothesis has been suggested.

**Key words:** lunar-solar tides, Love number, gravity, thermoelasticity.

### Литература

1. *Клайн М.* Математика. Поиск истины. – М.: Мир, 1988. – 295 с.
2. *Longman I.M.* Formulas for Computing the Tidal Acceleration Due to the Moon and the Sun // *J. Geophys. Res.* – 1959. – V. 64, No 12. – P. 2351–2355.
3. *Маловичко А.К., Костицын В.И.* Гравиразведка. – М.: Недра, 1992. – 357 с.
4. *Love A.E.H.* Some Problems of Geodynamics. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1911. – xxvii + 180 p.
5. *Мельхиор П.* Земные приливы. – М.: Мир, 1968. – 482 с.
6. *Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M.* Tides for a convective Earth // *J. Geophys. Res.* – 1999. – V. 104, No B1. – P. 1035–1058.
7. *Молоденский С.М.* Влияние неоднородностей упругих модулей, топографии и термоупругих деформаций среды на амплитуды и фазы приливных волн // *Изменение ок-*

- ружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 1: Сейсмические процессы и катастрофы. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 262–282.
8. *Latychev K., Mitrovica J.X., Ishiib M., Chan N.H., Davis J.L.* Body tides on a 3-D elastic earth: Toward a tidal tomography // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2009. – V. 277, No 1–2. – P. 86–90.
  9. *Лубков М.В.* О влиянии крупномасштабных неоднородностей мантии на суточные числа Лява // *Геофиз. журн.* – 2011. – Т. 33, № 2. – С. 129–134.
  10. *Молоденский М.С., Крамер М.В.* Земные приливы и нутация Земли. – М.: Изд-во АН СССР. 1961. – 41 с.
  11. *Jeffreys H., Vicente R.O.* The theory of nutation and the variation of latitude // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1957. – V. 117. – P. 142–161.
  12. *Alterman Z., Jarosch H., Pekeris, C.L.* Oscillations of the Earth // *Proc. R. Soc. Lond. A.* – 1959. – V. 252, No 1268. – P. 80–95.
  13. *Кузнецов Г.Е.* Глубинное строение и геодинамика недр Республики Татарстан // Мониторинг геологической среды: активные эндогенные и экзогенные процессы: Материалы I Всерос. конф. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2000. – С. 35–50.
  14. *Khristoforova N.N., Khristoforov A.V., Muslimov R.Kh.* Temperature distribution and anomalies in the crystalline basement of the Tataria Arch // *Phys. Chem. Earth (A).* – 2000. – V. 25, No 6. – P. 597–604.
  15. *Takeuchi H.* On the Earth tide of the compressible Earth of variable density and elasticity // *Trans. Am. Geophys. Union.* – 1950. – V. 31. – P. 651–689.
  16. *Гарленд Дж.Д.* Форма Земли и сила тяжести. – М.: Мир, 1967. – 196 с.
  17. *Молоденский С.М.* Резонанс жидкого ядра по данным приливных гравиметрических наблюдений в Талгаре // *Физика Земли.* – 2009. – № 10. – С. 3–8.
  18. *Молоденский С.М.* О влиянии регионального рельефа на приливные деформации (на примере Эльбрусского вулканического центра) // *Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 1: Сейсмические процессы и катастрофы.* – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 255–261.

Поступила в редакцию  
10.10.12

---

**Утёмов Эдуард Валерьевич** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [eutemov@mail.ru](mailto:eutemov@mail.ru)

**Нургалиев Данис Карлович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, проректор по научной деятельности Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [danis.nourgaliev@ksu.ru](mailto:danis.nourgaliev@ksu.ru)

**Харисов Айрат Гумерович** – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [airat.x@gmail.com](mailto:airat.x@gmail.com)

**Матвеева Наталья Александровна** – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [limonich@mail.ru](mailto:limonich@mail.ru)