

УДК 551.466

## ИНЕРЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ GPS-ГЕОДЕЗИИ

Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Колодезников И.И., Маршалов А.Я.

*Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Нерюнгри, e-mail: trofimenko\_sergei@mail.ru*

Представлены результаты GPS-геодезии в области сочленения двух геологических структур Алданского щита и Становой складчатой системы, обладающей высоким сейсмическим потенциалом. Пункт измерений выбран вблизи сейсмически активной системы разломов. За трехлетний интервал измерений из суммарного сигнала выделена циклическая компонента движения блока. Анализ формы кривой периодической составляющей движения показал, что адекватная модель движения блока может быть описана нелинейным уравнением синус-Гордона. Сопоставление результатов измерений данного исследования с геодинамическими исследованиями эпохи 70-х годов 20-го века свидетельствует об идентичности результатов трендовой модели. На основе двух эпох наблюдений рассмотрена задача циклического взаимодействия блоков земной коры. Следствием данного взаимодействия является зарегистрированная миграция очагов слабых землетрясений в течение года на границах геодинамических блоков. Сделано предположение, что нелинейные эффекты при длительном действии инерционных сил приводят к накоплению деформаций на границах блоков. Вследствие этого возможно либо формирование деформационных зон в виде надвигов либо разрядка напряжений в виде сильного землетрясения. Нарушение выделенных закономерностей в годичных циклах может свидетельствовать о начале процессов формирования очага землетрясения. В этой связи результаты GPS-измерений в зонах активных разломов имеют практическое значение при изучении геодинамических предвестников землетрясений.

**Ключевые слова:** земная кора, блоковое строение, нелинейное взаимодействие блоков, деформация, геодинамические предвестники землетрясений

## INERTIA MODEL INTERACTION CRUSTAL BLOCKS ACCORDING GPS-GEODESY

Trofimenko S.V., Grib N.N., Kolodeznikov I.I., Marshalov A.J.

*Technical Institute (branch) «North-Eastern Federal University of M.K. Ammosov», Neryungri, e-mail: trofimenko\_sergei@mail.ru*

The results of GPS-geodesy at the junction of two geological structures of the Aldan shield and Stanovoi fold system with high seismic potential. Item selected measurements near a seismically active fault systems. Over the three-year period of measurements of the total signal is selected cyclical component of motion of the block. Analysis of the shape of the curve of the periodic component of motion showed that an adequate model of the motion block can be described by a nonlinear equation of the sine-Gordon equation. Comparison of measurement results of this study with geodynamic studies age 70 years of the 20th century reveals the identity of the results of the trend model. On the basis of the two periods of observation considered the problem of cyclic interaction of crustal blocks. The effect of this interaction is a registered migration pockets of small earthquakes for a year on the borders of geodynamic units. It is suggested that non-linear effects in the long action of inertial forces lead to the accumulation of strain at the boundaries of the blocks. As a consequence, perhaps, or the formation of deformation zones in the form of thrust or discharge voltage as a major earthquake. Violation of the laws identified in the annual cycle may signal the beginning of the formation of the earthquake. In this regard, the results of GPS-measurements in active fault zones are of practical importance in the study of geodynamic earthquake precursors.

**Keywords:** Earth's crust, block structure, nonlinear interaction of blocks, deformation, earthquake precursors geodynamic

Район исследований охватывает западную часть южной окраины Алданского щита Сибирской платформы и сопряженную с ним северную окраину позднеархейско-раннепротерозойской Становой складчатой системы, разделенных системой разломов Станового шва (рис. 1).

В пределах района широко распространены продукты мезозойской тектоно-магматической активизации, образующие несколько протяженных поясов, параллельных друг другу и Становому шву, которые накладывались на гетерогенный раннедокембрийский фундамент. Они представлены поясом гранодиоритовых батолитов Станового хребта, Южно-Алданской системой впадин, выпол-

ненных мощными (до 5 км) угленосными толщами юры и неокома, субщелочными и щелочными вулканическими и интрузивными образованиями триасово-раннемелового возраста, широко распространенными на южной окраине Алданского щита. Эти зоны в совокупности соответствуют активной континентальной окраине мезозойского возраста (Парфенов и др., 1983).

Современные протяженные системы горных поднятий района, которые, судя по высокой сейсмической активности, продолжают развиваться и в настоящее время, начали формироваться в неогене после длительного периода пенепленизации в поздне-мелу – палеогене (Тимофеев, 1968).

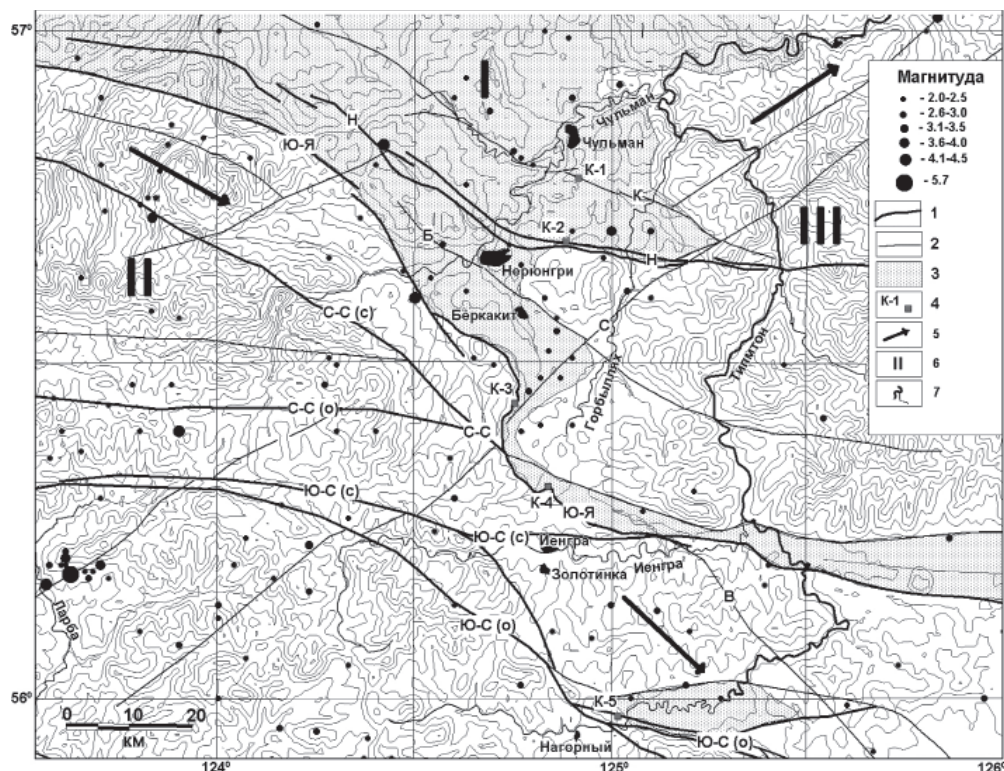


Рис. 1. Активные разломы и сейсмичность Южной Якутии.

Горизонталы рельефа проведены через 100 м:

Условные обозначения: 1, 2 – активные разломы (1 – основные; 2 – второстепенные); К – Кабактинский; Н – Нижне-Нерюнгринский; Б – Беркакитский; С – Суннагино-Ларбинский; Ю-Я – Южно-Якутский; В – Верхне-Гонамский; С-С (с) – Северо-Становой (северная ветвь); С-С (о) – Северо-Становой (основная ветвь); Ю-С (с) – Южно-Становой (северная ветвь); Ю-С (о) – Южно-Становой (основная ветвь); 3 – мезозойские отложения мезо-кайнозойских впадин: Ч – Чульманская; О – Окурданская; В – Верхне-Тимптонская; 4 – места детального изучения зон активных разломов в горных выработках; 5 – направление векторов горизонтальных смещений блоков земной коры эпохи 70-х годов 20-го века; 6 – блоки земной коры по геодинамическим данным (I – Чульманский, II – Зверевский, III – Горбыляхский); 7 – элементы речной сети

Ведущую роль в тектоническом строении рассматриваемого региона играют разрывные нарушения различного ранга, объединяемые в Южно-Якутскую и Становую системы разломов. Южно-Якутская система разломов образована сопряженными зонами нарушений преимущественно взбросо-надвиговой кинематики, осложняющих южную часть Чульманской мезозойской впадины. Доминирующую роль среди них занимает плоскость Южно-Якутского взбросо-надвига, представляющего собой региональную тектоническую границу между докембрийскими образованиями Станового хребта и мезозойскими осадками Южно-Якутской системы впадин. Плоскость сместителя наклонена на юг под углами 10–70°, горизонтальная амплитуда суммарного смещения по интерпретации гравитационных полей составляет около 12–15 км [Геодинамика ..., 1985].

Изучение активных разломов геофизическими методами и в горных выработках позволило охарактеризовать амплитуды мо-

лодых смещений и выявить проявления сильных землетрясений. Результаты проведенных исследований [ТРоф, 2009] позволили составить карту активных разломов Южной Якутии (см. рис. 1). Максимальная дислоцированность мезозойских пород и морфологические проявления в четвертичных осадках и формах рельефа связаны с Кабактинской, Нижне-Нерюнгринской и Беркакитской зонами разломов. Для кинематики разломов характерно наличие сдвиговых, надвиговых и сбросовых деформаций [ТРоф, 2009].

Для изучения современной геодинамической обстановки в изучаемом районе в 2009 г. в пункте «Нерюнгри» (см. рис. 1) начаты непрерывные измерения вертикальных и горизонтальных смещений методом GPS-геодезии.

Северное ограничение блока, на котором находится пункт GPS, связано с Нижне-Нерюнгринской зоной разломов, расположенной в пределах принадвиговой зоны Чульманского прогиба, которая представляет собой сложнодислоцированную область,

разбитую многочисленными разломами взбросо-надвигового, сдвигового и сбросового типа. Вблизи пункта регистрации южная ветвь Нижне-Нерюнгринского разлома меняет направление с широтного восточнее р. Чульман на северо-западное.

Южное ограничение блока связано с Беркакитским разломом, расположенным в принадвиговой сложнослощенной зоне непосредственно севернее Южно-Якутского надвига. В современном рельефе Беркакитский разлом имеет отчетливое выражение в виде серии уступов суммарной высотой до 50 м.

Восточным ограничением блока является Суннагино-Ларбинская зона разломов правосдвиговой кинематики смещений с незначительной сбросовой компонентой [Ов-

сюченко, Трофименко, 2009]. Смещения по Суннагино-Ларбинскому разлому находятся в тесной взаимосвязи с взбросо-надвиговыми подвижками по Южно-Якутскому разлому, в значительной степени компенсируя их правосдвиговыми перемещениями.

Таким образом, пункт регистрации может быть вовлечен в различные типы движений и деформаций земной коры в соответствии с кинематикой обрамляющих активизированных разломов. Размеры блока около  $15 \times 20 \text{ км}^2$ .

### Результаты измерений

На рис. 2 представлены графики смещения пункта регистрации в горизонтальной и вертикальной плоскости, а также изменение скорости модуля полного смещения.

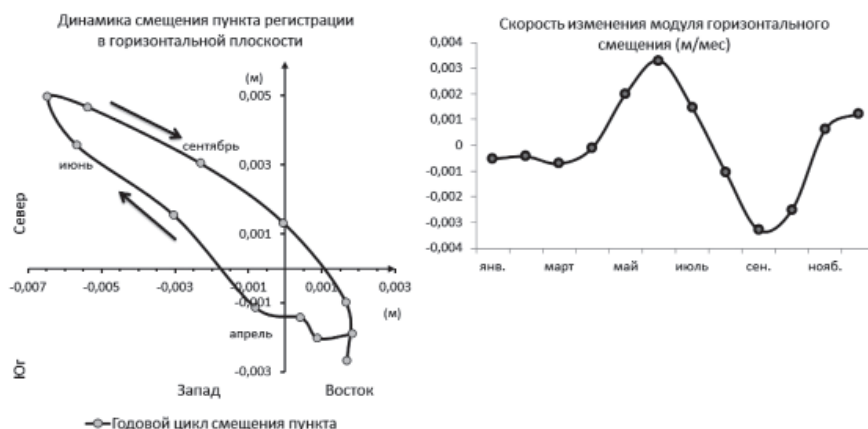


Рис. 2. Динамика смещения пункта измерений в горизонтальной плоскости

Второй пункт наблюдений был организован южнее, вблизи Беркакитского разлома

(см. рис. 1). Суммарные графики смещения пунктов представлены на рис. 3–4.

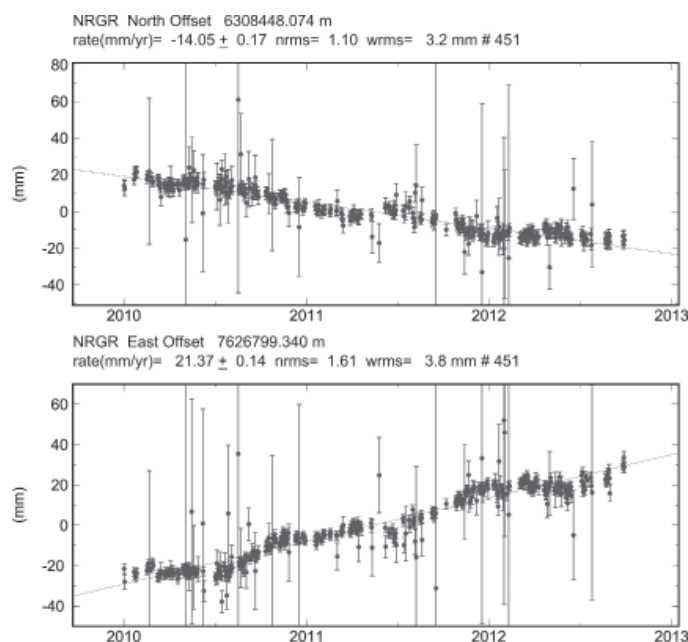


Рис. 3. Суммарные смещения пункта в зоне влияния Нижне-Нерюнгринской системы разломов

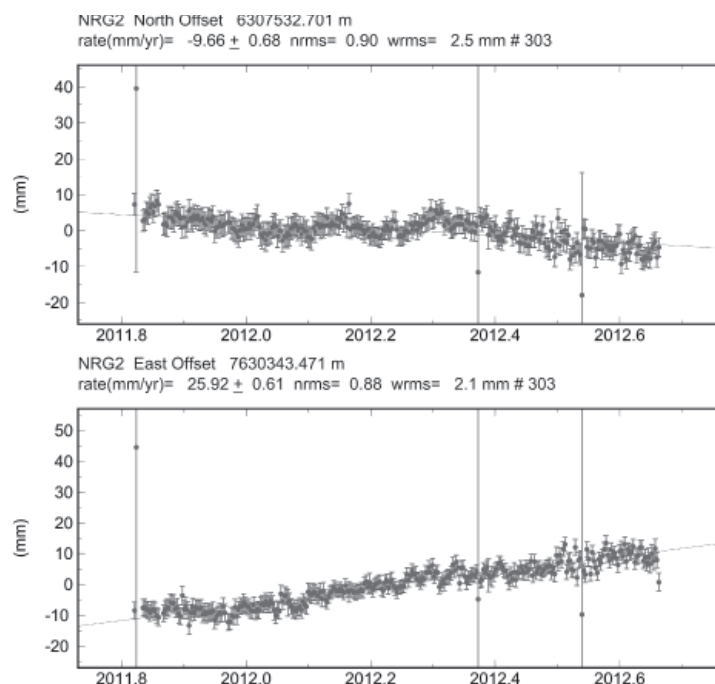


Рис. 4. Суммарные смещения пункта в зоне влияния Беркавитского разлома

### Выводы

Выделенные типы движений за период измерений можно представить в виде расширенной аддитивной модели, описанной формулой

$$Y_t = U_t^1 + V_t^1 + S_t^1 + C_t^2 + C_t^1 + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $U_t^1$  – систематические изменения в виде короткопериодных трендов;  $V_t^1$  – сезонная компонента, обусловленная влиянием на геофизический фактор природно-климатических условий;  $C_t^2$  – периодическая компонента смещения;  $S_t^1$  – спорадические изменения смещений вследствие сейсмо-тектонических процессов.

Основным структурным элементом аддитивной модели является тренд  $U_t$ , обуславливающий наличие систематического изменения наблюдаемого показателя в течение продолжительного времени. Определение величины и направления  $U_t$  может быть осуществлено после детального изучения всех компонент ряда (1) за период измерений, превышающий 3-летний цикл, в соответствии с аналогичными исследованиями авторов [Саньков, 2005, Коломиец, 2005].

Развитие деформационного процесса по соотношению горизонтальных движений может свидетельствовать о его связи с геометрией активных разломов. Аналогичными исследованиями на северо-восточном фланге БРЗ установлено направленное сме-

щение забайкальского геоблока к юго-востоку [Саньков, 2005]. Геолого-геофизические исследования в исследуемом районе показали, что по системам разрывных нарушений северо-восточного простирания формируются сбросы в комбинации с левосторонними сдвиговыми перемещениями. По широтным разломам доминируют сдвиговые деформации с подчиненной вертикальной составляющей [Овсученко, Трофименко, 2009].

Выделенные типы движений могут быть обусловлены кинематикой Нижне-Нерюнгринской зоны разломов [Рогожин и др., 2007]. Распределение азимутов свидетельствует о вовлечении в деформационный процесс диагональной системы разломов северо-восточного и северо-западного простирания с одновременным воздействием на блок горизонтальных сжимающих сил.

В геодинамическом плане оба пункта расположены в блоке I (рис. 1). По данным геодезических исследований прежних лет данный блок вовлечен в зону высоких градиентов вертикальных и горизонтальных движений различных знаков смещений. Причем зона высоких градиентов ограничивается Южно-Якутским надвигом. Вследствие этого различие в скоростях смещения пунктов может быть обусловлено кинематическим влиянием восточного и западного массивных блоков, формирующих систему надвигов.

С другой стороны, данная кинематика движения пунктов отражает кинематику

Нижне-Нерюнгринской системы разломов в виде сбросов. Беркакитский разлом в настоящее время подвержен лево-сдвиговым перемещениям, слабо демпфируемой системой широтных и северо-восточных по простиранию разломов. Вследствие этого I блок (см. рис. 1) за период наблюдений в 2012 году можно рассматривать как вращающуюся против часовой стрелки систему с одновременным поднятием западного фланга.

Вследствие этого в зоне влияния Нерюнгринской системы разломов возможно формирование трещин отрыва, что особенно важно учитывать при горных работах как на существующих, так и на вновь открываемых горных предприятиях.

Важным следствием проведенного анализа следует считать тот факт, что формирование надвиговых зон на изучаемой площади может быть обусловлено инерционным взаимодействием блоков. Нарушение циклических изменений в динамике смещения блоков может служить основанием для разработки моделей геодинамических предвестников землетрясений.

Таким образом, в данной работе впервые сделана попытка построения модели формирования надвиговых зон в результате инерционного взаимодействия блоков земной коры, обусловленных неравномерным вращением Земли в течение года, а также показана возможность прогнозирования землетрясений на основе геодинамических предвестников землетрясений.

#### Список литературы

1. Геодинамика Олекмо-Становой сейсмической зоны / Л.М. Парфенов, Б.М. Козьмин, В.С. Имаев и др. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. – 136 с.
2. Предварительные результаты исследования стабильности GPS пункта VLADIVOSTOK и тектонической активности Приморья / А.Г. Коломиец, Н.В. Шестаков, М.Д. Герасименко, М. Касахара, Т. Кито // Сейсмоакустика переходных зон: Четвертый всероссийский симпозиум 05–09 сентября 2005 г. – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2005. – С. 144–149.
3. Очаговые зоны сильных землетрясений Южной Якутии / А.Н. Овсюченко, С.В. Трофименко, А.В. Мараханов, П.С. Карасев, Е.А. Рогожин // Физика Земли. – 2009. – № 2. – С. 15–33.
4. Детальные геолого-геофизические исследования зон активных разломов и сейсмическая опасность Южно-Якутского региона / А.Н. Овсюченко, С.В. Трофименко, А.В. Мараханов и др. // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28. – № 4. – С. 55–74.
5. Парфенов Л.М., Натальин Б.А., Попеко Л.И. Тектоника восточной части Монголо-Охотской складчатой системы и природа сопряженных с ней зон мезозойской тектономагматической активизации Алдано-Становой области // Тихоокеанская геология. – 1983. – № 2. – С. 26–33.
6. Сейсмотектоника зоны сочленения структур Байкальской рифтовой зоны и орогенного поднятия Станового хребта / Е.А. Рогожин, А.Н. Овсюченко, С.В. Трофименко

и др. // Геофизические исследования. – М.: Изд-во ИФЗ. – 2007. – Вып. 8. – С. 81–116.

7. Современные движения литосферных блоков Центральной Азии по данным GPS-геодезии / В.А. Саньков, К.Г. Леви, А.В. Лухнев, А.И. Мирошниченко // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2005. – С. 165–179.

8. Тимофеев Д.А. Некоторые общие вопросы неотектоники и морфотектоники на примере геоморфологической истории Южной Якутии // Проблемы геоморфологии и неотектоники орогенных областей Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 1968. – Т. 2. – С. 235–244.

9. Трофименко С.В., Гриб Н.Н. Геомеханическая модель блокового движения земной коры // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/103-6462> (дата обращения: 19.06.2012).

#### References

1. Geodinamika Olekmo-Stanovoj sejsmicheskoy zony/ Parfenov L.M., Koz'min B.M., Imaev V.S. i dr. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1985. 136 p.
2. Kolomiec A.G., Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., M. Kasaxara, T. Kito Predvaritel'nye rezul'taty issledovaniya stabil'nosti GPS punkta VLADIVOSTOK i tektonicheskoy aktivnosti Primor'ya // Sejsmoakustika perexodnyx zon: Chetvertyj vserossijskij simpozium 05–09 sentyabrya 2005. Vladivostok: Izd-vo DVGU. 2005. pp. 144–149.
3. Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Maraxanov A.V., Karasev P.S., Rogozhin E.A. Ochagovye zony sil'nyx zemletryasenij Yuzhnoj Yakutii // Fizika Zemli. 2009. no. 2. pp. 15–33.
4. Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Maraxanov A.V. i dr. Detal'nye geologo-geofizicheskie issledovaniya zon aktivnyx razlomov i sejsmicheskaya opasnost' Yuzhno-Yakutskogo regiona // Tixookeanskaya geologiya. 2009. tom 28. no. 4. pp. 55–74.
5. Parfenov L.M., Natal'in B.A., Popeko L.I. Tektonika vostochnoj chasti Mongolo-Oxotskoj skladchatoj sistemy i priroda sopryazhennyx s nej zon mezozojskoj tektonomagmaticheskoj aktivizacii Aldano-Stanovoj oblasti // Tixookeanskaya geologiya. 1983. no. 2. pp. 26–33.
6. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V. i dr. Sejsmotektonika zony sochleneniya struktur Bajkal'skoj riftovoj zony i orogennogo podnyatiya Stanovogo xrebra // Geofizicheskie issledovaniya. M.: Izd-vo IFZ. 2007. vyp. 8. pp. 81–116.
7. San'kov V.A., Levi K.G., Luxnev A.V., Miroshnichenko A.I. Sovremennye dvizheniya litosfernyx blokov Central'noj Azii po dannym GPS-geodezii // Aktual'nye voprosy sovremennoj geodinamiki Central'noj Azii. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2005. pp. 165–179.
8. Timofeev D.A. Nekotorye obshhie voprosy neotektoniki i morfotektoniki na primere geomorfologicheskoy istorii Yuzhnoj Yakutii // Problemy geomorfologii i neotektoniki orogennyx oblastej Sibiri i Dal'nego Vostoka. Novosibirsk. 1968. T. 2. pp. 235–244.
9. Trofimenko S.V., Grib N.N. Geomekhanicheskaya model' blokovogo dvizheniya zemnoj kory // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. no. 3; URL: <http://www.science-education.ru/103-6462> (data obrashheniya: 19.06.2012).

#### Рецензенты:

Максимов Е.П., д.г.-м.н., профессор на кафедре геологии, Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Нерюнгри;

Заровняев Б.Н., д.т.н., профессор, декан горного факультета Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск.

Работа поступила в редакцию 04.04.2013.