

В. А. Минаев¹, А. О. Фаддеев², Т. Р. Ахметшин³, Т. М. Невдах⁴

(¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, ²Академия ФСИН России, ³Уфимский государственный нефтяной технический университет, ⁴Академия ФСИН России, e-mail: m1va@yandex.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрены две модели оценки геодинамического риска в литосфере: вероятностная и "энергетическая". Показана научная новизна подхода к оценке коэффициентов вероятностной модели. Подтверждена её адекватность на основе сравнения результатов расчётов с распределением эпицентров землетрясений в литосфере, произошедших за период времени 1914-2014 гг. "Энергетическая" модель позволяет корректировать величины напряжений после реализации опасного геодинамического события, то есть землетрясения. Преимущество модели – в её физической наглядности и возможности с достаточным приближением оценивать реальные литосферные процессы.

Ключевые слова: модель, вероятность, сейсмодеоформационная энергия, геодинамический риск, литосфера.

Введение

В последние годы активизировались исследования в области создания математических моделей, позволяющих выполнять количественные оценки таких важных распределённых параметров земной коры, как температура, вязкость, упругие модули, напряжения, деформации, смещения [1-5].

Получаемая в результате исследований обширная числовая информация по характеристикам литосферных геодеоформационных процессов даёт возможность вплотную подойти к решению задачи построения принципиально новой цифровой модели литосферы Земли. В настоящей статье рассмотрены две новые модели, позволяющие на надёжной методической основе оценивать геодинамический риск в литосфере и корректировать оценки величин напряжений в земной коре после реализации в каком-либо месте нового опасного геодинамического события, то есть землетрясения.

Результаты решения названных задач необходимы для научно обоснованной организации предупредительных мероприятий по линии МЧС и других оперативных служб в связи с прогнозируемыми в различных регионах страны и мира чрезвычайными ситуациями геодинамического характера.

Вероятностная модель оценки

Первой рассмотрим модель, позволяющую выполнять оценки геодинамического риска с позиций вероятностного подхода, являющегося, на взгляд авторов, наиболее адекватным с системных позиций к описанию сложных процессов, происходящих в литосфере [1, 2, 5].

Так, детерминированная количественная оценка напряжений в литосфере всегда вызывает множество вопросов. Самым значимым из них является вопрос о величинах сдвиговых напряжений. Эти оценки разнятся, и весьма существенно: в работах Е. В. Артюшкова приводятся значения фоновых сдвиговых

напряжений в пределах 75-120 *мПа* [3], Ю. В. Ризниченко и А.М. Артамонов оценивают те же напряжения в диапазоне значений 100-200 *мПа* [4]. Это – примеры глобальных оценок. Региональные оценки имеют ещё больший разброс значений сдвиговых напряжений.

Всё это говорит о том, что оценка напряжений с использованием детерминированных математических моделей не позволяет надёжно определять не только сами величины напряжений, но и однозначно устанавливать диапазоны их изменения.

Рядом авторов предложены различные модификации модели вероятностной оценки геодинамического риска, основанные на использовании дифференциальных уравнений Колмогорова [2, 5].

В этих уравнениях присутствуют коэффициенты α_{ij} , которые физически отражают величины интенсивности процессов, приводящих к переходу элементарного объёма геологической среды из состояния i в состояние j . С оценкой этих коэффициентов возникают существенные проблемы.

Авторами работ, в которых рассматриваются подобные модели, полагается, что коэффициенты α_{ij} определяются на основании комплексной оценки следующих величин:

$$\alpha_{13} = E_p; \quad \alpha_{31} = E_p - D_{Ep}; \quad \alpha_{32} = E_p + \dot{u}_r + \dot{u}_z; \quad \alpha_{23} = E_p + \dot{u}_r + \dot{u}_z - S_E, \quad (1)$$

где D_{Ep} – величина рассеяния потенциальной энергии E_p деформируемых пород геосреды;

S_E – величина сброшенной энергии при реализации геодинамических событий;

$\dot{u}_r = \frac{2\mu u_r^2}{3}$, $\dot{u}_z = \frac{2\mu u_z^2}{3}$ – обобщённые (переведённые в энергетические единицы) значения горизонтальных u_r и вертикальных u_z смещений в геологической среде.

Для оценки величины D_{Ep} необходимо знать значения модуля сдвига μ и вязкости среды η для рассматриваемого объёма геосреды, исследованных в работах авторов [7, 8].

Количественная оценка величины S_E связана с использованием имеющейся в свободном доступе информации о произошедших геодинамических событиях (землетрясениях) в пределах оцениваемого элементарного объёма геологической среды.

А вот с обобщёнными значениями горизонтальных u_r и вертикальных u_z смещений в геологической среде возникают определённые сложности, связанные с определением величин коэффициентов α_{ij} .

Суть использованной авторами модели для решения этой задачи состоит в следующем.

Имеются три состояния: равновесное устойчивое состояние (состояние 1); неравновесное неустойчивое состояние (состояние 2); квазиравновесное состояние (состояние 3) (рис. 1).

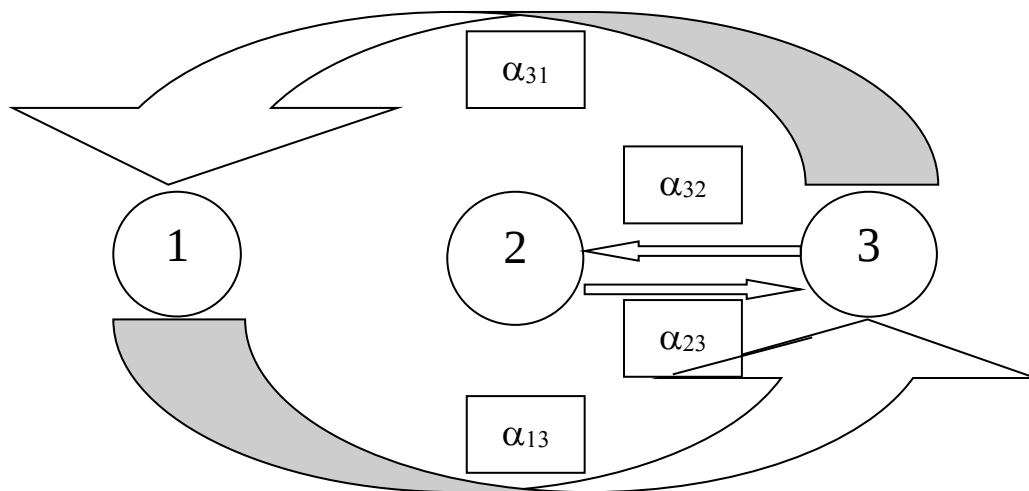


Рис. 1. Схема взаимопереходов геологической среды между состояниями

В отличие от традиционного подхода коэффициент α_{13} определяется как:

$$\alpha_{13} = \mu \cdot u'_z \cdot t, \quad (2)$$

где μ – модуль сдвига;

u_z – вертикальное смещение;

$$u'_z = \partial u_z / \partial x + \partial u_x / \partial z;$$

t – время (один год, выраженный в секундах).

Физически коэффициент α_{13} , характеризующий переход элементарного объёма геологической среды из равновесного состояния в квазиравновесное состояние, представляет собой накопленные деформации за год, обусловленные влиянием на геологическую среду литосферных и подлитосферных процессов, количественно оцениваемых по распределению аномального гравитационного поля в изостатической редукции.

Коэффициент α_{32} рассчитывается на основании следующего соотношения:

$$\alpha_{32} = [\mu \cdot (u'_z + u'_r) + TensionV] \cdot t, \quad (3)$$

где $u'_r = \partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x$;

$TensionV$ – вязкие сдвиговые напряжения, определяемые по формуле

$$TensionV = TensionU \cdot e^{-\frac{\mu \cdot t}{\eta}}, \quad (4)$$

где $TensionU$ – сдвиговые напряжения, рассчитанные по упругой модели;

η – вязкость геологической среды.

Согласно соотношениям (3) и (4), коэффициент α_{32} характеризует накопленные сдвиговые напряжения в элементарном объёме геологической среды с учётом их релаксации, оцениваемые не только на основе влияния процессов, оцениваемых по распределению аномального гравитационного поля, но и литосферных процессов, обусловленных знакопеременными вертикальными и горизонтальными движениями отдельных блоков земной коры.

Физически коэффициент α_{32} описывает переход элементарного объёма геологической среды из квазиравновесного состояния в неравновесное, то есть в состояние, соответствующее возможности реализации опасного геодинамического события [1].

Коэффициент α_{23} "отвечающий" за обратный переход элементарного объёма геологической среды из неравновесного состояния в квазиравновесное состояние, оценивается по формуле:

$$\alpha_{23} = \mu \cdot (u'_z + u'_r) \cdot t. \quad (5)$$

Геологическая среда, находясь в квазиравновесном состоянии, продолжает "излучать" сейсмодеоформационную энергию [9], и даже при реализации сейсмического события она вся не сбрасывается, а "переизлучается".

Если осуществляется переход из неравновесного состояния в квазиравновесное состояние, то энергия "излучается" по всем направлениям, во всех плоскостях. А в случае перехода из квазиравновесного состояния в равновесное, устойчивое состояние, деформации не столь велики, и миграция сейсмодеоформационной энергии осуществляется вдоль нарушений сплошности геологической среды, особенно вдоль разломных тектонических структур, преимущественно в горизонтальных плоскостях на различных глубинных уровнях. Как показали исследования, для миграции сейсмодеоформационной энергии при её незначительной интенсивности необходимо наличие участков с "вихревой" закрученностью литосферных процессов.

Поскольку такие участки в литосфере распространены не повсеместно, то величину коэффициента α_{31} следует оценивать посредством горизонтальных смещений по формуле

$$\alpha_{31} = \mu \cdot u'_r \cdot t. \quad (6)$$

Сами же вероятности нахождения элементарного объёма геологической среды в состояниях 1, 2, 3 вычисляются по известным для вероятностной модели соотношениям [1, 2, 5]:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\alpha_{23}\alpha_{31}}{\alpha_{13}\alpha_{23} + \alpha_{13}\alpha_{32} + \alpha_{23}\alpha_{31}}; \\ p_2 = 1 - \frac{\alpha_{13} + \alpha_{31}}{\alpha_{31}} p_1; \\ p_3 = 1 - p_1 - p_2. \end{cases} \quad (7)$$

На рис. 2 приведены результаты расчётов вероятностного геодинамического риска в глобальном масштабе для литосферы Земли на глубинах в 33 км, выполненные с использованием соотношений (7).

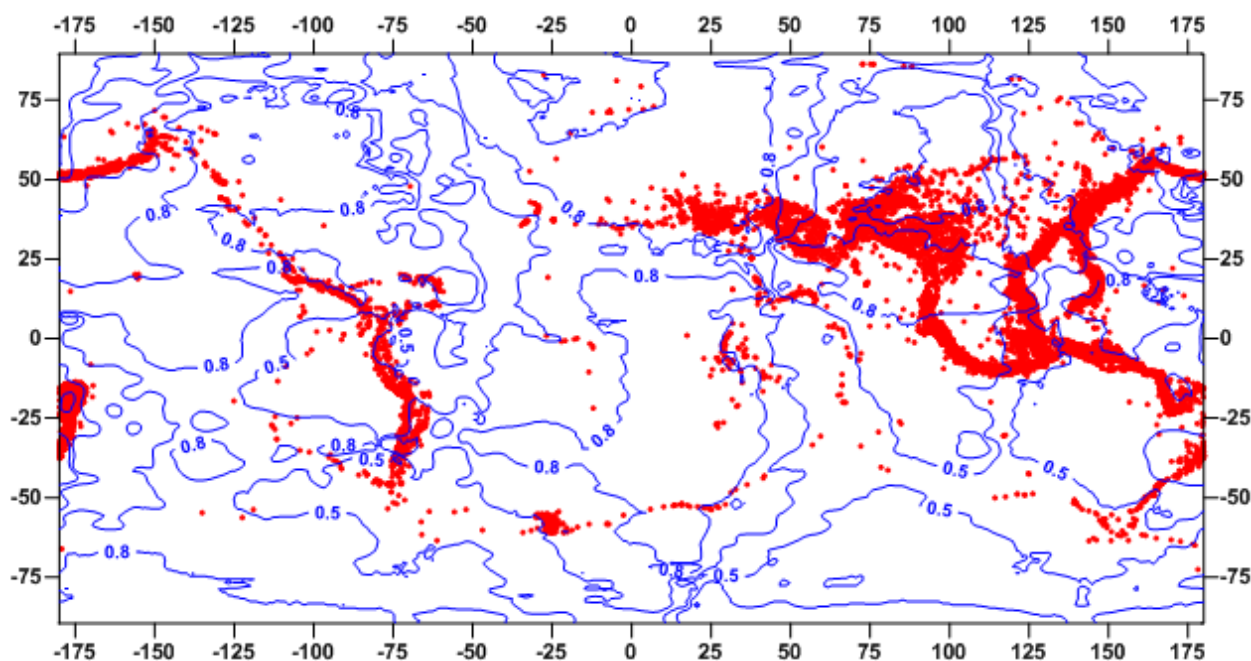


Рис. 2. Эквипотенциальное распределение вероятностного геодинамического риска для литосферы Земли (глубина 33 км)

Как видно из рис. 2, результаты расчётов хорошо согласуются с распределением эпицентров землетрясений, произошедших на глубинах порядка 33 км за период времени 1914-2014 гг., что говорит об адекватности предложенного подхода к количественной оценке коэффициентов α_{ij} , входящих в соотношения (7).

Энергетическая модель оценки

Рассмотрим ещё одну модель, названную авторами "энергетической" моделью. Своё название она получила из-за того, что позволяет скорректировать (переоценить) величины напряжений после реализации в каком-либо месте опасного геодинамического события, то есть землетрясения. Вопрос о таких переоценках достаточно давно поднимался в научной литературе, однако до модельной и алгоритмической реализации дело не доходило. Авторами настоящей статьи было решено устранить указанный пробел, что привело к построению и реализации "энергетической" модели оценки геодинамического риска.

Для переоценки напряжений накопившиеся сдвиговые напряжения в рассматриваемом элементарном объёме геологической среды с координатами его центра (x_0, y_0, z_0) переведём в энергию упругой деформации E_0 в соответствии с соотношением [10]:

$$E_0(x_0, y_0, z_0) = \frac{3[\tau(x_0, y_0, z_0)]^2}{2\mu(x_0, y_0, z_0)}, \quad (8)$$

где τ – полное сдвиговое напряжение;

μ – модуль сдвига.

Изменение величины сейсмодеоформационной энергии, выделившейся вследствие реализации опасного геодинамического события, при удалении от его эпицентра, полагается в соответствии с законом нормального распределения:

$$E(x, y, z) = \frac{E_0(x_0, y_0, z_0)}{\sqrt{(2\pi)^3}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]\right\}, \quad (9)$$

где x – долгота;

y – широта;

z – глубина;

x_0, y_0, z_0 – соответственно, координаты эпицентра опасного геодинамического события.

Выполним обратный пересчёт величины сейсмодеоформационной энергии в сдвиговые напряжения в интересующем нас объёме литосферного пространства по формуле:

$$\tau(x, y, z) = \tau_{\text{исх}}(x, y, z) + \sqrt{\frac{2\mu(x, y, z) \cdot E(x, y, z)}{3}}, \quad (10)$$

где $\tau_{\text{исх}}(x, y, z)$ – первоначальное значение сдвиговых напряжений в элементарном объёме геологической среды с координатами центра (x, y, z) .

Очевидно, что зависимость изменения энергии при удалении от эпицентра носит несколько "идеальный" характер. Ведь в соотношении (10) не учтены ни неоднородности геологической среды в виде тектонических активных нарушений, ни другие активные геологические структуры типа взбросов, надвигов и других подобных образований, исследуемых в современных научных работах [11-15]. Однако, как показали практические расчёты, оно обладает достаточно хорошим приближением к реальным свойствам литосферы планеты на различных её глубинных уровнях.

Выводы

1. В работе предложены две новые модели – вероятностная и "энергетическая", – позволяющие на новой методической основе производить анализ опасностей геодинамической природы, используя оценку геодинамического риска и корректировку оценок напряжений в земной коре после реализации сейсмических событий.

2. Вероятностная модель представляет собой модификацию уже существующей модели оценки вероятностного геодинамического риска. Суть модификации заключается в обладающем новизной, геофизически обоснованном подходе к расчёту коэффициентов модели α_{ij} , характеризующих переход элементарного объёма геологической среды из состояния i в состояние j , что, как показали практические расчёты, позволяет выполнять адекватные оценки вероятностного геодинамического риска.

3. Назначение "энергетической" модели – обеспечение возможности численной переоценки величин напряжений после реализации в каком-либо элементарном объёме геологической среды сейсмического события. Преимущество модели в её физической наглядности и возможности с достаточным приближением оценивать реальные литосферные процессы.

Литература

1. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Кузьменко Н.А. Моделирование и оценка геодинамических рисков. М.: "РТСофт" – "Космоскоп", 2017. 256 с.
2. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В., Павлова С.А. Обобщённая вероятностная модель для оценки геодинамической устойчивости территорий // Технологии техносферной безопасности. 2013. Вып. 5 (51). <http://academygps.ru/ttb>.
3. Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука. 1993. 456 с.
4. Ризниченко Ю.В., Артамонов А.М. Развитие энергетической модели пространственно-временного хода сейсмичности // Физика Земли. 1975. № 12. С. 35-42.
5. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В. Разломно-узловая тектоническая модель оценки геодинамической устойчивости территориальных систем // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 1 (29). С. 90-99.
6. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Попов А.Н. Математическое моделирование геодинамических рисков на территории Коста-Рики // Спецтехника и связь. 2014. №2. С. 46-49.
7. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир. 2004. 612 с.
8. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Горная книга, 2012. 264 с.
9. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Долгосрочный прогноз сейсмической опасности на территории Северной Евразии // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. Т. 2. Сейсмичность. М.: Региональная общественная организация учёных по проблемам прикладной геофизики, 2002. С. 319-380.
10. Минаев В. А., Фаддеев А. О. Оценки геозкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, изд. дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.
11. Коровкин В.Н., Шароглазова Г.А., Вечерская Е.Н. Сравнительный анализ существующих карт современных вертикальных движений земной коры для территории Беларуси // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. 2009. № 12. С. 142-145.
12. Коровкин В.Н., Соловьев А.Н. Математическое моделирование геодинамических процессов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. 2013. № 16. С. 117-121.
13. Mooney W.D., Laske G., Masters T.G. CRUST 5.1: A global Crustal Model at 5°x5°. // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103B. Pp. 727-747.
14. Jang J.S. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 1993. Vol. 23. Pp. 665-685.
15. Senachin V.N., Baranov A.A. Gravity Anomalies of the Crust and Upper Mantle for Central and South Asia // Geodynamics & Tectonophysics. 2016. Vol. 7 (4). No. 4. Pp. 513-528.

Материал поступил в редакцию 5 августа 2018 г.

Для цитирования: Минаев В. А., Фаддеев А. О., Ахметшин Т. Р., Невдах Т. М. Математические модели оценки геодинамического риска при исследовании литосферных процессов // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 6 (82). – 2018. – С. 40-47. DOI: 10.25257/TTS.2018.6.82.40-47.

V. A. Minaev, A. O. Faddeev, T. R. Akhmetshin, T. M. Nevdakh
MATHEMATICAL MODELS OF GEODYNAMIC RISK ESTIMATION
AT THE LITHOSPHERE PROCESSES RESEARCH

Two mathematical models of geodynamic risk estimation in the lithosphere are considered: probabilistic and "energetic". The scientific novelty of the methodical approach to estimation of probability model coefficients is shown. Its adequacy on the basis of matching calculation results and distribution of earthquakes' epicenters in the lithosphere, which occurred during the period of 1914-2014, is confirmed. The energetic model allows correct the magnitude of the tensions after the implementation of dangerous geodynamic events, i.e. earthquakes. The advantage of the model is in its physical visibility and the ability to assess the real lithospheric processes with sufficient approximation. The results of solving the above mentioned tasks are necessary for a scientifically based organization of preventive actions through the Ministry of emergency situations and other operational services in connection with forecast of geodynamic emergency situations in various regions of Russia and the world.

Key words: model, probability, seismic deformation energy, geodynamic risk, lithosphere.

References

1. Minaev V. A., Faddeev A. O., Kuz'menko N. A. *Modelirovanie i ocenka geodinami-cheskih riskov* [Modeling and assessment of geodynamic risks]. Moscow, "RTSoft" – "Kosmoskop" Publ., 2017, 256 p.
2. Minaev V. A., Faddeev A. O., Abramova A. V., Pavlova S. A. *Obobshchennaya veroyatnost-naya model' dlya ocenki geodinamicheskoy ustojchivosti territorij Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti* [Generalized probabilistic model for estimation of geodynamic stability of territories]. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, vol. 5 (51), 2013.
3. Artyushkov E. V. *Fizicheskaya tektonika* [Physical tectonics]. Moscow, Nauka Publ., 1993, 456 p.
4. Riznichenko Yu. V., Artamonov A. M. *Razvitie ehnergeticheskoy modeli prostranst-venno-vremennogo hoda sejsmichnosti* [Development of the energy model of the space-time course of seismicity]. *Fizika Zemli / Physics Of The Earth*, 1975, no. 12. pp. 35-42.
5. Minaev V. A., Faddeev A. O., Abramova A. V. *Razlomno-uzlovaya tektonicheskaya mo-del' ocenki geodinamicheskoy ustojchivosti territorial'nyh sistem* [Fault-nodal tectonic model for estimation of geodynamic stability of territorial systems]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of risk management in the technosphere*, 2014, no. 1 (29), pp. 90-99.
6. Minaev V. A., Faddeev A. O., Popov A. N. *Matematicheskoe modelirovanie geodina-micheskikh riskov na territorii Kosta-Riki* [Mathematical modeling of geodynamic risks in Costa Rica]. *Spektekhnika i svyaz / Special equipment and communication*, 2014, no. 2. pp. 46-49.
7. Lobkovskij L. I., Nikishin A. M., Hain V. E. *Sovremennye problemy geotektoniki i geodinamiki* [Modern problems of geotectonics and geodynamics]. Moscow, Nauchnyj mir Publ., 2004, 612 p.
8. Kuz'min Yu. O., Zhukov V. S. *Sovremennaya geodinamika i variacii fizicheskikh svoystv gornyh porod* [Modern geodynamics and variations of physical properties of rocks]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2012, 264 p.
9. Ulomov V. I., SHumilina L. S. *Dolgosrochnyj prognoz sejsmicheskoy opasnosti na territorii Severnoj Evrazii* [Long-term forecast of seismic hazard in Northern Eurasia]. *Katastroficheskie processy i ih vliyanie na prirodnuyu sredu* [Catastrophic processes and their impact on the natural environment], vol. 2. *Sejsmichnost' [Seismicity]*. Moscow, Regional public organization of scientists on problems of applied Geophysics, 2002, pp. 319-380.
10. Minaev V. A., Faddeev A. O. *Ocenki geoehkologicheskikh riskov. Modelirovanie bezopasnosti turistsko-rekreacionnyh territorij* [Assessment of geoecological risks. Modeling of safety of tourist and recreational areas], Moscow, Finansy i statistika Publ., INFRA-M Publ., 2009, 370 p.
11. Korovkin V. N., Sharoglazova G. A., Vecherskaya E.N. *Sravnitel'nyj analiz sushchestvuyushchih kart sovremennyh vertikal'nyh dvizhenij zemnoj kory dlya territorii Belarusi* [Comparative analysis of existing maps of modern vertical movements of the earth's crust for the territory of Belarus]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo / Bulletin of Polotsk state University. Series F. Applied science. Construction*. 2009, no. 12, pp. 142-145.
12. Korovkin V. N., Solov'ev A. N. *Matematicheskoe modelirovanie geodinamicheskikh processov* [Mathematical modeling of geodynamic processes]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo / Bulletin of Polotsk state University. Series F. Applied science*, 2013, no. 16. pp. 117-121.
13. Mooney W. D., Laske G., Masters T. G. CRUST 5.1: A global Crustal Model at 5°x5°, *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103B, pp. 727-747.
14. Jang J. S. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* 1993, vol. 23. pp. 665-685.
15. Senachin V. N., Baranov A. A. Gravity Anomalies of the Crust and Upper Mantle for Central and South Asia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2016, vol. 7 (4), no 4. pp. 513-528.

For citation: Minaev V. A., Faddeev A. O., Akhmetshin T. R., Nevdakh T. M. Mathematical models of geodynamic risk estimation at the lithosphere processes research. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 6 (82), 2018, pp. 40-47 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2018.6.82.40-47.