

УДК 553.3:550.343

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОМАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА MAGSAT, С ГИПОЦЕНТРАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Харитонов А.Л.

*ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова» Российской академии наук, Москва, e-mail: ahariton@izmiran.ru*

Наблюдаемое на низкоорбитальном искусственном спутнике Земли MAGSAT геомагнитное поле является суммарным отражением различных детерминированных и случайных физических процессов и природных явлений, происходящих в различных геофизических слоях Земли (магнитосфера, ионосфера, мантия, внешнее ядро). Цель данной статьи – показать наличие определенной взаимосвязи геомагнитных аномалий, измеренных на низкоорбитальном искусственном спутнике Земли, и гипоцентров землетрясений. Наличие такой связи может позволить разработать методику прогноза землетрясений. Для разработки методики прогноза землетрясений и связанных с ними электромагнитных эффектов, возникающих в пределах сейсмоактивных тектонических разломов земной коры, по данным искусственных спутников Земли, необходимо разделить влияние различных физических процессов, отражающихся в измеряемом на спутнике геомагнитном поле. Тектонические напряжения возникают при относительных перемещениях соседних тектонических блоков земной коры. Часть этих относительных напряжений тектонических блоков возникает не внезапно, в момент разрыва, а нарастает постепенно в течение длительного периода времени. Это явление и дает возможность проследить во времени влияние накопления упругих напряжений во временных измерениях аномального магнитного поля, измеренного на низкоорбитальном искусственном спутнике Земли, так как накопление упругих напряжений – часть общего относительного перемещения крупных тектонических блоков земной коры и верхней мантии. В результате использования спутниковых геомагнитных данных выявлены субвертикальные электромагнитные неоднородности, которые коррелируют с географическим расположением разломных тектонических сейсмоактивных структур. Разрабатываемая технология с использованием спутникового мониторинга ортогональных составляющих геомагнитного поля может быть применена для прогнозирования аварийных ситуаций на важных технических объектах (железнодорожные линии, гидроэлектростанции) для предотвращения экологических катастроф.

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, искусственный спутник Земли, тектонические разломы, землетрясения

## RESULTS OF STUDYING THE RELATIONSHIP OF GEOMAGNETIC ANOMALIES OBTAINED FROM THE MAGSAT SATELLITE DATA WITH EARTHQUAKE HYPOCENTERS

Kharitonov A.L.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation  
Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: ahariton@izmiran.ru*

The geomagnetic field observed on the "MAGSAT" low-orbit artificial satellite of the Earth is a total reflection of various deterministic and random physical processes and natural phenomena occurring in various layers of the Earth (magnetosphere, ionosphere, mantle, outer core). The purpose of this article is to show the presence of a certain relationship between geomagnetic anomalies measured on a low – orbit artificial satellite of the Earth and earthquake hypocenters. The presence of such a link may allow us to develop a methodology for predicting earthquakes. To develop a methodology for predicting earthquakes and related electromagnetic effects that occur within seismically active tectonic faults of the earth's crust, according to artificial earth satellites, it is necessary to separate the influence of various physical processes reflected in the geomagnetic field measured on the satellite. Tectonic stresses arise from the relative movements of neighboring tectonic blocks of the earth's crust. Part of these relative stresses of tectonic blocks does not occur suddenly, at the moment of rupture, but increases gradually over a long period of time. This phenomenon makes it possible to trace in time the influence of the accumulation of elastic stresses in time measurements of the anomalous magnetic field on the low-orbit artificial satellite of the Earth, since the accumulation of elastic stresses is part of the total relative movement of large tectonic blocks of the Earth's crust and upper mantle. As a result of the use of satellite geomagnetic data, subvertical electromagnetic inhomogeneities have been identified, which correlate with the geographical location of fault tectonic seismically active structures. The developed technology using satellite monitoring of orthogonal components of the geomagnetic field can be used to predict emergency situations at important technical facilities (railway lines, hydroelectric power plants) to prevent environmental disasters.

**Keywords:** geomagnetic field, artificial satellite of the Earth, tectonic faults, earthquakes

Для выделения по спутниковым геомагнитным данным очагов сейсмической активности, сейсмоактивных разломных структур на момент полета низкоорбитального искусственного спутника Земли

MAGSAT, для прогноза возможных тектонических деформаций и движений земной коры требуется предварительное, последовательное исключение составляющих этого поля, связанных с более глубокими

электромагнитными процессами во внешнем ядре и мантии Земли с помощью сферического гармонического [1, с. 852; 2, с. 4] и вейвлет-анализа [3, с. 382] или источников, расположенных на больших расстояниях вне поверхности геоида Земли, а именно в магнитосфере, ионосфере, атмосфере (влияние электромагнитных эффектов суббурь) [4, с. 61; 5, с. 8], с помощью метода естественных ортогональных составляющих [1, с. 853]. Поэтому анализ компонент  $Z_a$ ,  $X_a$ ,  $Y_a$  аномального магнитного поля, измеренных нами по спутниковым данным MAGSAT, выполнялся после удаления значений главного магнитного поля, значений магнитосферного кольцевого тока и значений ионосферного тренда по специальной методике [3, с. 383; 4, с. 61; 5, с. 9]. Основные физические процессы, с которыми в настоящее время найдены в спутниковом геомагнитном поле определенные зависимости: физические процессы во внешнем ядре Земли [1, с. 854], в магнитосфере, в межпланетном магнитном поле (ММП) [4, с. 62], случайные во времени и пространстве физические явления типа сильных землетрясений [6, с. 718; 7, с. 125], суммарная энергия которых экспоненциально возрас-

тала за последние 300 лет (рис. 1), а также процессы активизации сети тектонических разломов в земной коре [8, с. 123; 9, с. 51], тонкие локальные процессы в ионосфере и магнитосфере Земли [4, с. 62; 5, с. 11].

Для того чтобы разработать методику прогноза землетрясений (и выделения связанных с ними сейсмоактивных тектонических разломов) с использованием низкоорбитальных космических аппаратов, необходимо к анализу спутникового геомагнитного поля подойти с позиций общей классификации физических процессов и сначала разделить измеренное геомагнитное поле на две основные части: детерминированную и случайную [3, с. 382]. К детерминированной периодической части спутникового геомагнитного поля можно отнести составляющую, связанную с глобальными процессами, происходящими в ядре Земли, и которые могут быть представлены с помощью сферического гармонического ряда (рис. 2).

Другая детерминированная периодическая часть спутникового геомагнитного поля связана с периодическими физическими процессами, происходящими в магнитосферном кольцевом слое [4, с. 63].

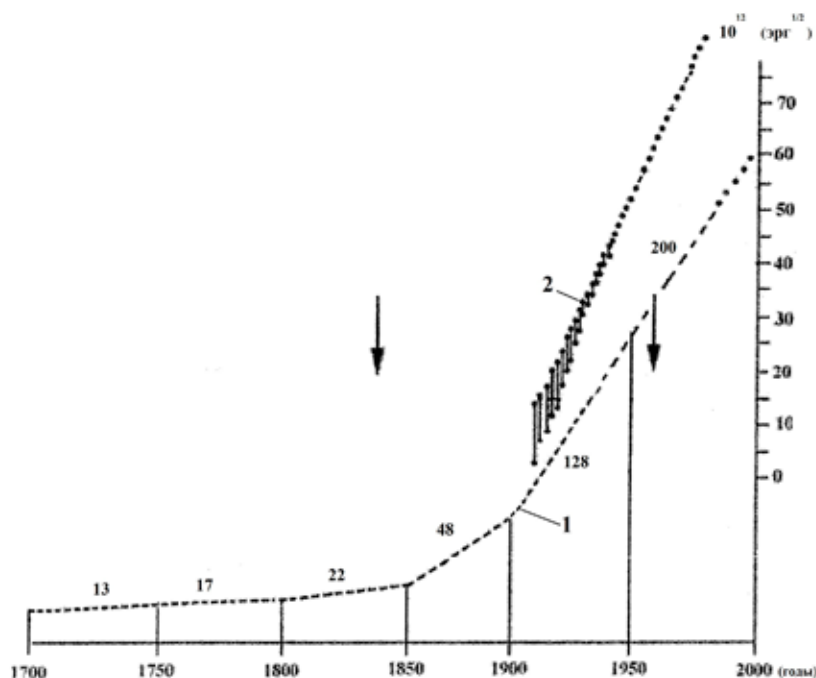


Рис. 1. 1 – количество сильных землетрясений, произошедших в каждом 50-летнем временном интервале, начиная с 1700 и до 2000 года; 2 – график экспоненциального роста суммарной энергии сильных землетрясений. Стрелками отмечены временные периоды вулканической активизации земных недр



Рис. 2. Схема классификации физических процессов и природных явлений, вызывающих эффекты в измеряемом геомагнитном поле на низкоорбитальном искусственном спутнике Земли

### Материал и методы исследования

Современное представление о разломной тектонике основано на теории новой глобальной тектоники и кинематических движениях литосферных плит [9, с. 51], в результате чего на стыке этих плит возникают механические и электромагнитные [10, с. 57]

напряжения, приводящие к резким сбросо-сдвиговым подвижкам земной коры, вызывающим землетрясения. Причем большинство геофизиков интересует не просто выделение крупных тектонических разломов, уже частично нанесенных на геологические карты во многих развитых странах и даже частично на дне океанов (рис. 3).

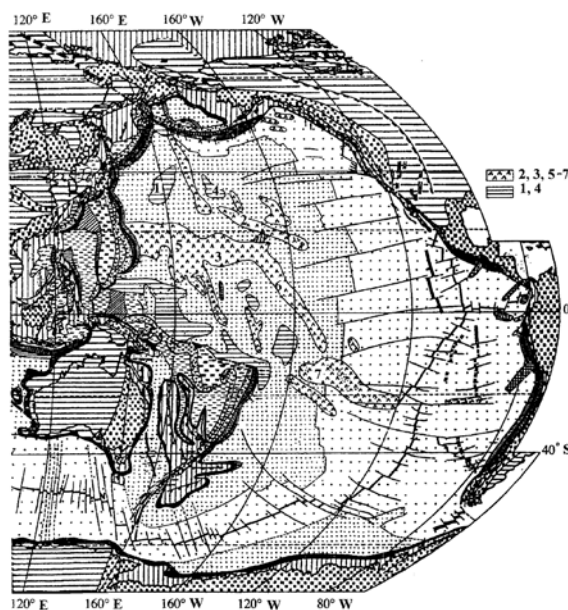


Рис. 3. Карта тектонического строения Тихоокеанского региона с субширотными региональными тектоническими разломами. Тихоокеанские поднятия: 1 – Шатского, 2 – Гавайское, 3 – Срединно-океаническое, 4 – Хесса, 5 – Маркуса, 6 – Линии-15, 7 – Туамоту, 8 – субширотные региональные тектонические разломы (Молокаи, Мендосино, Пионер и др.)

Всех, кто занимается прогнозом землетрясений с использованием спутниковых геомагнитных данных, в первую очередь интересуют, конечно же, сейсмоактивные разломы земной коры, проявляющие себя в момент проведения спутниковой магнитной съемки, как это показано на рисунке 4.

При сильных подвижках верхнего слоя земной коры тектонические разломы могут привести к некоторым разрушениям техногенных сооружений в результате землетрясений (рис. 5), подобно тому, как это произошло на территории Бурятии ( $M=5.5$ ).

На основании положений теории упругости можно сделать вывод, что поиск способов выделения таких сейсмоактивных зон связан с разработкой методов обнаружения и выделения упругих напряжений земной коры или других физических про-

цессов, корреляционно с ними связанных [10, с. 62]. Один из путей – использование измерений полей напряжений земной коры, предвещающих тектонические подвижки почвы. В случае измерения геомагнитного поля это часто бывает связано с анизотропией магнитной восприимчивости горных пород за счет возникновения пьезомагнитного эффекта. При напряжениях, возникающих накануне землетрясения, около 100 бар и при обычной намагниченности горных пород  $10^{-3}$  СГС могут возникать локальные изменения намагниченности  $10^{-5}$  СГС. Это создает на поверхности Земли сейсмомагнитные аномалии амплитудой 10-20 нТл и даже подводные электромагнитные аномалии [10, с. 67], а также электромагнитные аномалии в высокопроводящем ионосферном слое [5, с. 11].

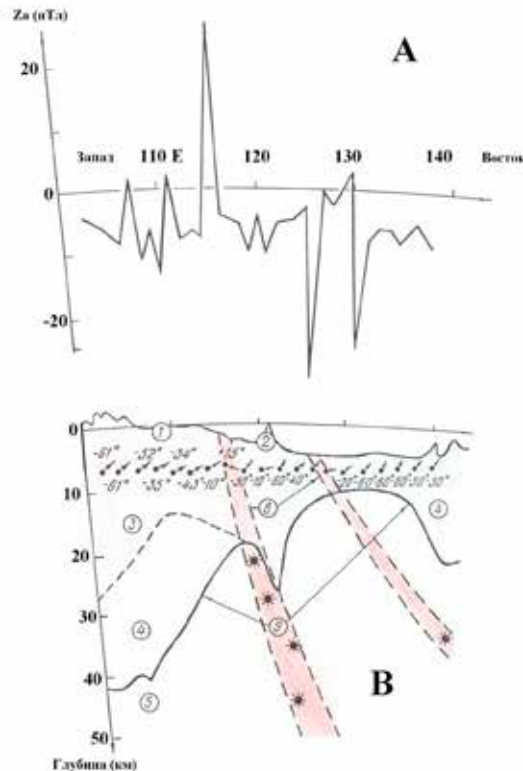


Рис. 4. Корреляционная связь спутниковых аномалий геомагнитного поля с сейсмоактивными тектоническими разломами земной коры (пунктирные линии) и связанных с ними гипоцентров землетрясений, проявляющаяся на широтном профиле, построенном по данным ИСЗ «MAGSAT».

А: аномальное геомагнитное поле –  $Z_a$ , измеренное (в нанотеслах) над сейсмоактивными тектоническими разломами;

В: 1 – поверхность Земли; 2 – расположение островной вулканической зоны, отделяющей глубоководную часть Тихого океана от его шельфовых морей; 3 – «гранитный» слой земной коры; 4 – «базальтовый» слой земной коры; 5 – верхнемантийный слой; 7 – стрелками показано направление аномального геомагнитного наклонения; 8 – тектонические разломы с расположенными в их пределах гипоцентрами землетрясений; 9 – расположение глубинной границы Мохоровичича; звездочками отмечено положение гипоцентров землетрясений в период работы на орбите спутника MAGSAT



Рис. 5. Пример повреждения железнодорожных путей после сильного землетрясения

### Результаты исследования и их обсуждение

Для выделения сейсмоактивных разломов с нарушением стратиграфических границ внутри литосферных плит были построены по спутниковым геомагнитным данным (MAGSAT) цифровые карты сейсмоактивных тектонических структур с секторной структурой  $1 \times 1$  градус. Был про-

веден сравнительный анализ построенной спутниковой цифровой карты электромагнитных линиаметов – линейных электромагнитных структур (рис. 6) с графическими схемами сейсмоактивных тектонических разломов (рис. 7) и некоторых других тектонических границ этого региона Тихого океана, выделенных по гидромагнитным и наземным геологическим данным [3, с. 383].

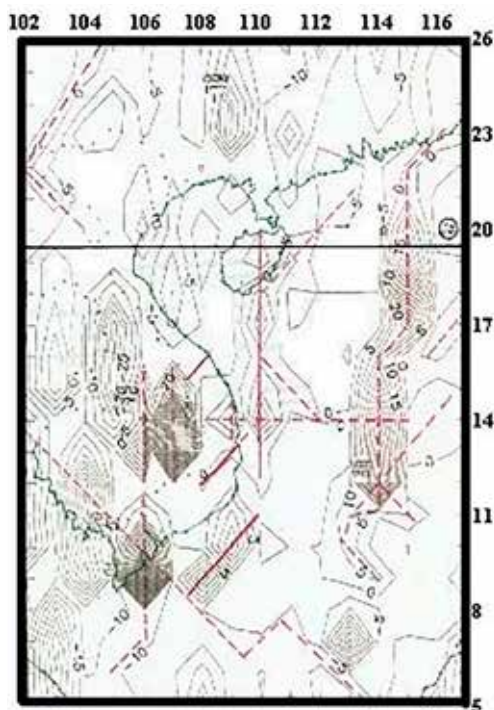


Рис. 6. Карта спутниковых электромагнитных линиаметов (линейных электромагнитных структур), ассоциируемых с сейсмоактивными тектоническими разломами, по данным спутника MAGSAT, построенная для юго-западной части Тихоокеанского региона.  
Горизонтальная ось – значения восточной долготы (в градусах);  
вертикальная ось – значения северной широты (в градусах)

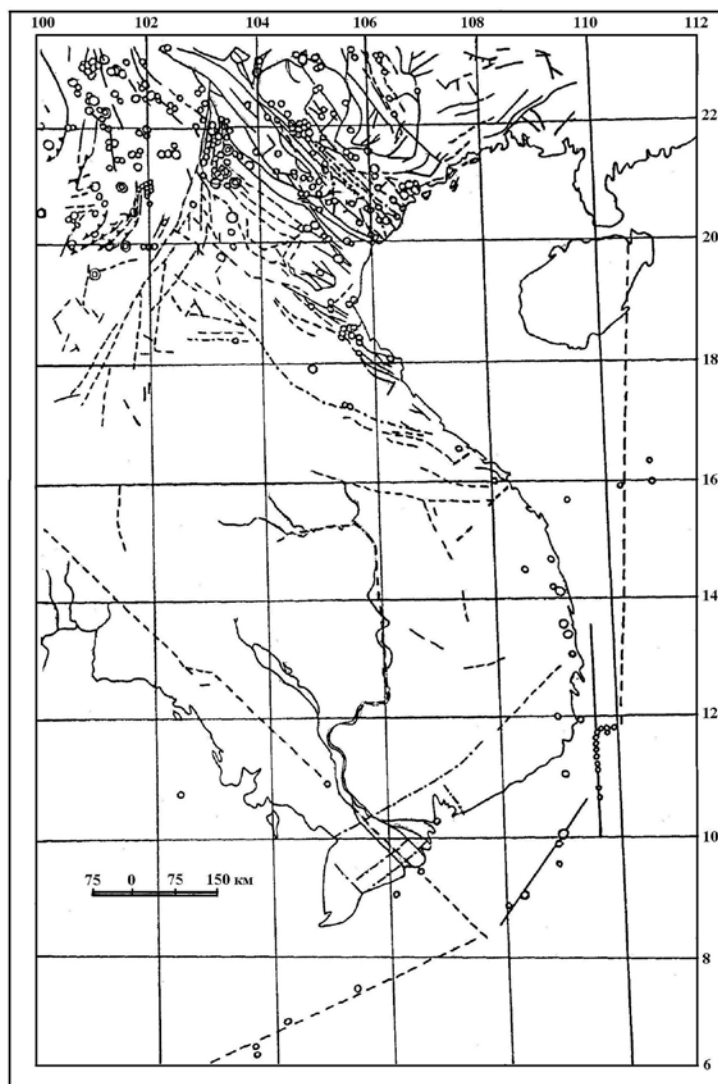


Рис. 7. Карта сейсмоактивных разломных тектонических структур по наземным геолого-геофизическим данным (сплошные линии – по геологическим данным, пунктирные линии – по геомагнитным и гравитационным данным). Окружностями обозначены эпицентры землетрясений, произошедшие в период проведения геомагнитной съемки ИСЗ MAGSAT, которые в основном привязаны к сейсмоактивным разломным тектоническим структурам

Известно, что все тектонические разломы являются каналами для постоянно текущих электрических токов между блоками земной коры различной эффективной намагниченности (и соответственно диэлектрической проницаемости) слагающих их горных пород. Поэтому линейные участки построенной нами цифровой спутниковой карты линейных электромагнитных структур в юго-западной части Тихоокеанского региона можно считать сейсмоактивными частями тектонических разломов, проявивших себя в период проведения съемки геомагнитного поля с по-

мощью низкоорбитального искусственного спутника Земли MAGSAT.

#### Заключение

Хорошее соответствие результатов геофизической интерпретации данных спутниковой карты аномального геомагнитного поля (ИСЗ MAGSAT) с наземными сейсмологическими и тектоническими данными позволяет указать на имеющуюся отчетливую связь аномального геомагнитного поля, измеренного на ИСЗ MAGSAT, с гипоцентрами землетрясений и сейсмоактивными разломными структурами литосферы.

### Список литературы / Reference

1. Оганесян А.С., Симонян А.О. Шахпаронян С.Р. Моделирование земного магнитного поля с учетом существования геомагнитных джерков // Геомагнетизм и аэронаука. 2014. Т. 44. № 6. С. 849-856.
- Oganesyan A.S., Simonyan A.O., Shakhparonyan S.R. Modeling of the Earth's magnetic field taking into account the existence of geomagnetic jerks // *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2014. Vol. 44. № 6. P. 849-856. (in Russian).
2. Харшиладзе А.Ф., Иванов К.Г. Секторный сферический гармонический анализ магнитного поля // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. Т. 43. № 1. С. 3-7.
- Kharshiladze A.F., Ivanov K.G. Sector spherical harmonic analysis of the Solar magnetic field // *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2013. Vol. 43. № 1. P. 3-7. (in Russian).
3. Харитонов А.Л. Результаты математической обработки геомагнитных данных, измеренных со спутников «MAGSAT», «CHAMP» над регионом Восточно-Европейской платформы // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: материалы XXII Всероссийской с международным участием научно-практической Щукинской конференции. Воронеж, 2020. С. 381-385.
- Kharitonov A.L. Results of mathematical processing of geomagnetic data measured from the «MAGSAT» and «CHAMP» satellites over the Eastern European Platform region // *Structure, material composition, properties, modern geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions: materials of the XXII All-Russian Scientific and Practical Shchukin Conference with International Participation*. Voronezh, 2020. P. 381-385. (in Russian).
4. Левитин А.Е., Громова Л.И., Громов С.В., Дремухина Л.А. Геомагнитная активность в полярной шапке при значительной северной вертикальной компоненте ММП // "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXV Annual Seminar, Apatity, 2012. С. 59-63.
- Levitin A.E., Gromova L.I., Gromov S.V., Dremukhina L.A. Geomagnetic activity in the polar cap with a significant northern vertical component of the IMP // "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXV Annual Seminar, Apatity, 2012. P. 59-63. (in Russian).
5. Ружин Ю.Я. Эффекты в ионосфере вызванные восходом Солнца в магнитосопряженном полушарии // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муромский институт ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых». Муром, 2020. С. 7-12.
- Ruzhin Y.Y. Effects in the ionosphere caused by sunrise in the magnetically coupled hemisphere // *All-Russian Open Armand readings. Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference*. Murom Institute of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov. Murom. 2020. P. 7-12. (in Russian).
6. Труонг К.Х., Во Т.С., Михайлов Ю.М., Харитонов А.Л., Капустина О.В. ОНЧ – электромагнитный фон в сейсмоактивном регионе Северного Вьетнама // Геомагнетизм и аэронаука. 2010. Т. 50. № 5. С. 717-720.
- Truong K.K., Vo T.S., Mikhailov Y.M., Kharitonov A.L., Kapustina O.V. VLF – electromagnetic background in the seismic active area of Northern Vietnam // *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2010. vol. 50. № 5. P. 717-720. (in Russian).
7. Сывороткин В.Л. Землетрясения // Пространство и время. 2011. Т. 2. № 4. С. 124-130.
- Syvorotkin V.L. Earthquakes // *Space and time*. 2011. Vol. 2. № 4. P. 124-130. (in Russian).
8. Стогний В.В., Стогний Г.А., Любимова Т.В. Геоэкологические риски территории Краснодарского края: проблема интегральной оценки степени геологических опасностей // Геология и геофизика юга России. 2021. Т. 11. № 1. С. 121-133.
- Stogniy V.V., Stogniy G.A., Lyubimova T.V. Geoeological risks of the territory of the Krasnodar territory: the problem of integral assessment of the degree of geological hazards // *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. P. 121-133. (in Russian).
9. Гаврилов С.В. Волны в вязком течении глины трения в разломе как механизм квазипрерывистого режима последникового поднятия // Геофизические исследования. 2011. Т. 12. № 3. С. 49-54.
- Gavrilov S.V. Waves in the viscous flow of the frictional clay in the fault as a mechanism of the rupture-like regime of postglacial rebound // *Geofizicheskie issledovaniya*. 2011. Vol. 12. № 3. P. 49-54. (in Russian).
10. Коротаяев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Киктенко Е.О., Орехова Д.А. Новые результаты Байкальского эксперимента по прогностическому эффекту макроскопических нелокальных корреляций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. № 4(85). С. 56-72.
- Korotayev S.M., Budnev N.M., Serdyuk V.O., Kiktenko E.O., Orekhova D.A. New results of the Baikal experiment on the prognostic effect of macroscopic nonlocal correlations // *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*. 2019. № 4(85). P. 56-72. (in Russian).