

**ФИЗИКА ИЛИМДЕРИ**  
**ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**PHYSICAL SCIENCES**

*Свердлик Л.Г., Имашев С.А.*

**РЕЖИМДИК ГЕОМАГНИТТИК БАЙКООЛОРДУН МААЛЫМАТТАРЫНЫН  
ЖЫШТЫК-УБАКЫТТУУ БӨЛҮШТҮРҮЛҮШҮ**

*Свердлик Л.Г., Имашев С.А.*

**ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАННЫХ РЕЖИМНЫХ  
ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

*L.G. Sverdlik, S.A. Imashev*

**TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION OF DATA OF REGULAR  
GEOMAGNETIC OBSERVATIONS**

УДК: 550.348: 550.388.2

Макалада Россия илимдер академиясынын Бишкек шаарындагы Илимий станциясынын Ак-Суу стационардык пунктунда 2015-жылдын октябрь айынан 2016-жылдын февраль айына чейинки убакыт аралыгында регистрацияланган магниттик талаанын толук векторунун вариацияларын жана Dst геомагниттик индексинин өзгөрүүлөрүн бирдиктүү жыштык-убакыттуу анализдөө натыйжалары көрсөтүлдү. Бул маалыматтар, жалпысынан геомагниттик вариациялардын жана алардын жеке спектралдык компоненттеринин убакытынын өтүшү менен татаал өзгөрүп турарын далилдейт. Үзгүлтүксүз вейвлет-өзгөртүүсүн пайдалануу аркылуу жердин магнит талаасынын вариацияларынын мезгилдүүлүгүнүн динамикасын изилдөө иши, геомагниттик вариацияларынын жергиликтүү жана глобалдык спектралдык компоненттеринин өзгөрүүлөрүнүн өзгөчөлүктөрүн табууга жардам берди. 0.25-31 күн мезгил диапазонунда бир нече өзгөчөлөнгөн геомагниттик вариациялар аныкталды. Сейсмикалык активдүүлүк, мындан да кыска мезгилдүү вариациялар менен байланыштуу болушу мүмкүн.

**Негизги сөздөр:** магниттик талаа, вариациялар, геомагниттик индекс, мезгил, спектрлардын динамикасы, вейвлет-өзгөртүү, жер титирөө.

Приведены результаты совместного частотно-временного анализа изменений геомагнитного индекса Dst и вариаций полного вектора магнитного поля, зарегистрированных на стационарном пункте Ак-Суу Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке в период с октября 2015 г. по февраль 2016 г. Приведенные данные свидетельствуют, что в целом геомагнитные вариации и их отдельные спектральные составляющие сложным образом меняются во времени. Исследование динамики периодичностей вариаций магнитного поля Земли, выполненное с ис-

пользованием непрерывного вейвлет-преобразования, позволило выявить особенности изменения локальных и глобальных спектральных составляющих геомагнитных вариаций во времени. Определены несколько хорошо выраженных геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 0.25 до 31 суток. Сейсмическая активность может, вероятно, иметь связь с вариациями, имеющими более короткие периоды.

**Ключевые слова:** магнитное поле, вариации, геомагнитный индекс, период, динамика спектров, вейвлет-преобразование, землетрясение.

We presented results of joint time-frequency analysis of change in geomagnetic index Dst and variations of magnetic field vector, registered at Ak-Suu stationary site of RS RAS in Bishkek for the period of October 2015 - February 2016. These data indicate that, in general, geomagnetic variations and their individual spectral components vary over time in a complex way. Study of dynamics of periodicities of variations of the Earth's magnetic field, carried out by using continuous wavelet transform, made it possible to identify the features of changes in the local and global spectral components of geomagnetic variations over time. Several well-pronounced geomagnetic variations were determined in the range of periods from 0.25 to 31 days. Seismic activity is likely to be related to variations with shorter periods.

**Key words:** magnetic field, variations, geomagnetic index, period, spectra dynamics, wavelet transformation, earthquake.

**Введение.** Периодичности временных геомагнитных вариаций, регистрируемых на земной поверхности, определяются не только глобальной составляющей, связанной с изменением солнечной активности и последующими ионосферными и магнитосферными возмущениями, но также процессами в то-

ковых системах жидкого ядра Земли [1]. Анализ результатов многих исследований, основанных на наблюдениях в сейсмоактивных регионах, показал, что геодинамические процессы подготовки и прохождения землетрясений сопровождаются характерными вариациями магнитного поля Земли в разных диапазонах частот [2-5]. Механизмы генерации локальных вариаций геомагнитного поля обычно связывают с пьезомагнитным и электрокинетическим эффектом, которые проявляются при активизации напряженно-деформированного состояния и динамики флюидов в земной коре [6-11]. Вместе с тем, аномальные изменения магнитного поля, неоднократно наблюдаемые наземными магнитометрами на больших расстояниях от эпицентра, дают основания предполагать наличие связи между литосферой, атмосферой и ионосферой, определяемой как телесеизмические магнитные возмущения (*Tele seismic Magnetic Disturbances, TMD*) [12] или сейсмоионосферный эффект [13].

Однако зависимость изменений геомагнитного поля от многих факторов не всегда позволяет однозначно интерпретировать наблюдаемые вариации. Для выявления связей между изменениями геомагнитного поля и другими природными явлениями (в частности сейсмической активностью), необходимо, в первую очередь, детально изучить спектр вариаций и уметь отделять случайную составляющую поля от регулярной [14, 15]. Применение современных методов обработки временных рядов, в частности, получившего в последнее десятилетие широкую популярность вейвлет-анализа, позволяет проследить развитие процесса во времени и анализировать не отдельные колебания, а исследовать частотно-временное поведение и характерные периодичности процесса генерации переменного геомагнитного поля [14, 16]. Данная работа является первой частью исследования геомагнитных эффектов землетрясений и посвящена выявлению характерных времен изменения магнитного поля на примере анализа данных режимных наблюдений, выполненных Научной станцией РАН в г. Бишкеке на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП). А также сопоставлению данных наблюдений с изменениями индекса геомагнитной активности.

**Исходные данные.** Система регулярных наземных геомагнитных наблюдений состоит из 7 стационарных пунктов, оснащенных модульными магнитовариационными протонными станциями типа МВ-07. Чувствительность станций составляет 0.01 нТл при

среднеквадратической погрешности 0.02 нТл. На всех стационарных пунктах БГП [13, 17] измерялась величина модуля полного вектора ( $T$ ) магнитного поля Земли. Дискретность измерений составляла 20 секунд. Для анализа использовались ряды цифровых данных, сформированные с шагом дискретизации  $\Delta t=1$  час, которые вычислялись как средние в выбранном интервале. В качестве исходных данных использовались результаты геомагнитного мониторинга на стационарном пункте Ак-Суу (АК), который используется в качестве базовой станции.

Для описания интенсивности магнитосферных возмущений мы использовали измерения Центра анализа данных земного и космического магнетизма Университета Киото Японии [18]. Изменения напряженности магнитного поля Земли относительно спокойного уровня оценивались низкоширотным геомагнитным индексом  $Dst$  (нТл), который является наиболее удобными для количественного анализа данных магнитных наблюдений и определяется наземными измерениями на четырех экваториальных станциях, равномерно распределенных по долготе, для каждого часа мирового времени ( $\Delta t=1$  час). Возмущение магнитного поля в пределах  $-(50-100)$  нТл и  $-(100-200)$  нТл свидетельствует о аperiodических возмущенных вариациях, типичных для средних и больших магнитных бурь, соответственно [19].

Результаты представлены на временном интервале с 1 октября 2015 г. по 29 февраля 2016 г. Этот период был выбран и представляет интерес потому, что включает два наиболее сильных землетрясения энергетического класса  $K>13.5$  (17 ноября и 07 декабря 2015 г.), из произошедших в регионе за последние годы [20].

#### **Методика обработки данных геомагнитных наблюдений.**

\* При подготовке данных экспериментальных наблюдений к обработке выполнялось восстановление непрерывных временных рядов  $T$  путем удаления выбросов, превышающих  $3\sigma$  и обусловленных различными помехами, и заполнении пропусков с использованием линейной интерполяции. После чего данные 20-секундных измерений усреднялись по часовым интервалам.

\* Исследование динамики периодичностей производилось с использованием непрерывного вейвлет-преобразования Морле [21], позволяющего отслежи-

вать изменение частотных свойств анализируемых рядов геомагнитных данных во времени. Для выделения области влияния краевых эффектов строился конус влияния. Поскольку в вейвлет-пространстве функция представляется в виде комбинации разномасштабных составляющих, которые содержат в себе информацию о величине отклонений от среднего уровня процесса в определенные моменты времени [22], чтобы обеспечить возможность сопоставления данных магнитной регистрации и геомагнитного индекса выполнялась нормирование временных рядов. Характеристикой интенсивности возмущений при этом являлась амплитуда вейвлет-коэффициентов.

\* Для выявления некоторых общих закономерностей и структуры нормированных временных рядов  $T$  и  $Dst$  и определения скрытых периодических составляющих рассчитывались автокорреляционные функции вариаций параметров.

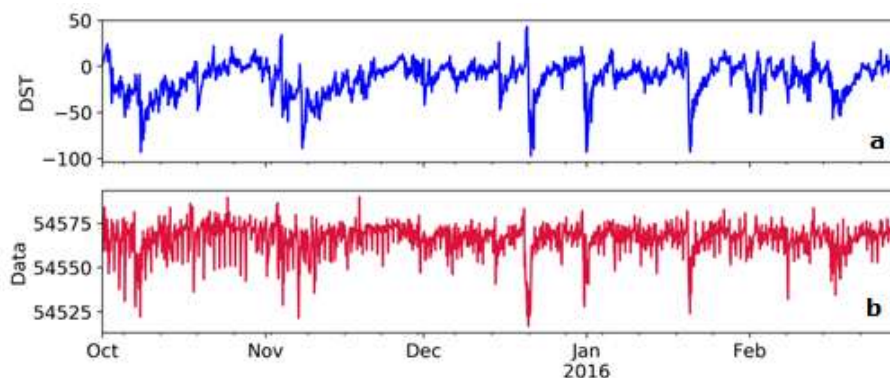
\* Важным фактором при исследовании связанных с сейсмической активностью геомагнитных вариаций является использование данных сети станций. При этом традиционная техника, применяемая для обработки геомагнитных наблюдений, состоит в необходимости нахождения разницы между показаниями, записанными на станциях возле эпицентра и удаленной опорной станцией, которая, как правило, расположена за пределами эпицентральной области. При проведении одновременных синхронных измерений могут производиться вычисления разности поля по каждой паре станций или по значениям магнитного

поля между базовой станцией и остальными пунктами.

Однако проверка возможного влияния самой базовой точки на характер проводимых измерений показала, что в ряде случаев наличие опорной точки в пределах самого полигона может быть не всегда оправданным [23]. Учитывая, что в наземных изменениях магнитного поля Земли преобладает влияние сложной системы токов, текущих в ионосфере и в магнитосфере (внешняя изменчивость), выделение имеющего внутри земное происхождение локального воздействия на непрерывно изменяющееся геомагнитное поле происходит путем предварительного извлечения солнечно-магнитосферного сигнала [24]. Поскольку индекс  $Dst$  отражает активность ионосферы и магнитосферы, связанную только с внешними источниками (магнитными возмущениями), и они не связаны с внутренними литосферными процессами, были также проанализированы временные ряды разности ( $Diff.$ ) между коэффициентами вейвлет-преобразования  $T$  и  $Dst$ .

#### Анализ данных, результаты и обсуждение.

**Вариации полного вектора магнитного поля Земли.** Данные регистрации модуля полного вектора магнитного поля  $T$  и геомагнитного индекса  $Dst$ , в период с октября 2015 по февраль 2016 г. показаны на рисунке 1. В течение этого периода исходные геомагнитные данные имели сложную внутреннюю структуру. В них присутствовали различные по амплитуде и частоте флуктуации.

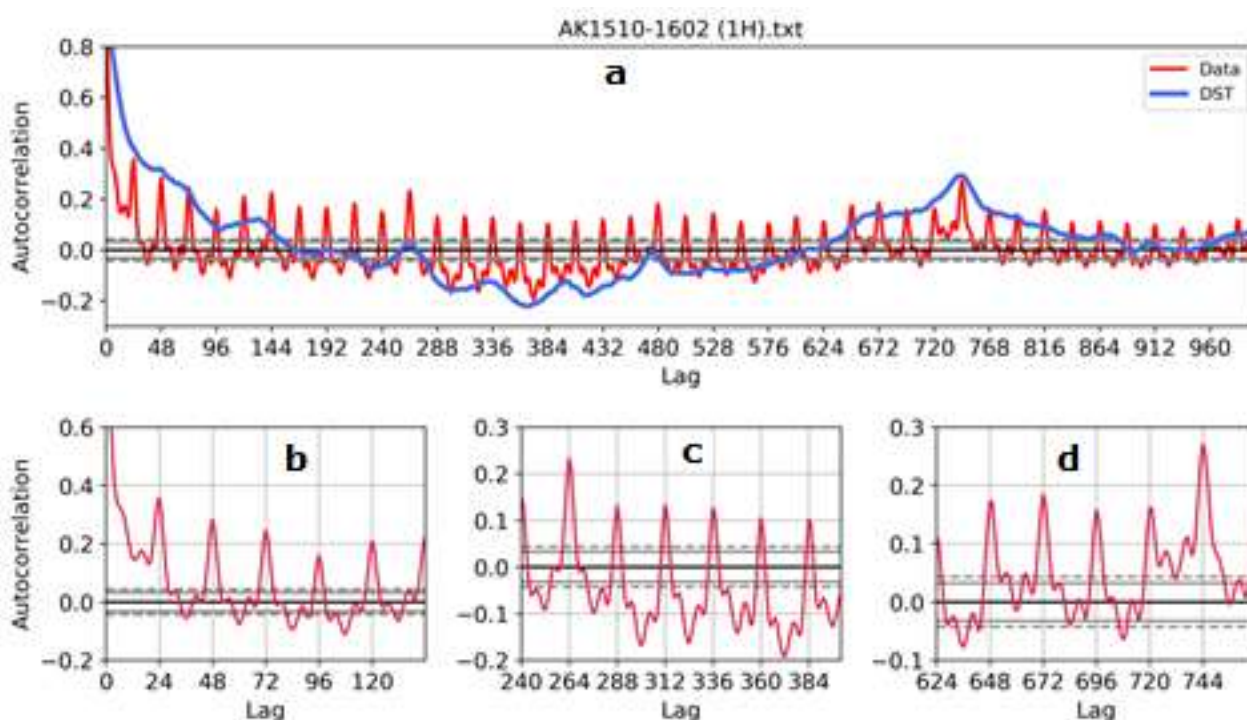


**Рис. 1.** Данные регистрации геомагнитного индекса  $Dst$  (a) и модуля полного вектора магнитного поля  $T$  на станции  $AK$  (b) в период с октября 2015 по февраль 2016 г.

Суточный ход геомагнитного поля изменялся от 20–30 нТл в октябре до ~10 нТл в конце февраля 2016 г. и в среднем составлял по амплитуде 10-15 нТл (рис. 1b). Типичные для главной фазы магнитной бури среднечасовые вариации *Dst*-индекса, достигающие аномальных величин по сравнению с регулярными вариациями и выходящие за пределы –100 нТл наблюдались 7-8 октября, 20-21 декабря 2015 г., 1 и 2 января 2016 г. (рис. 1a).

Расчёт автокорреляционной функции временных

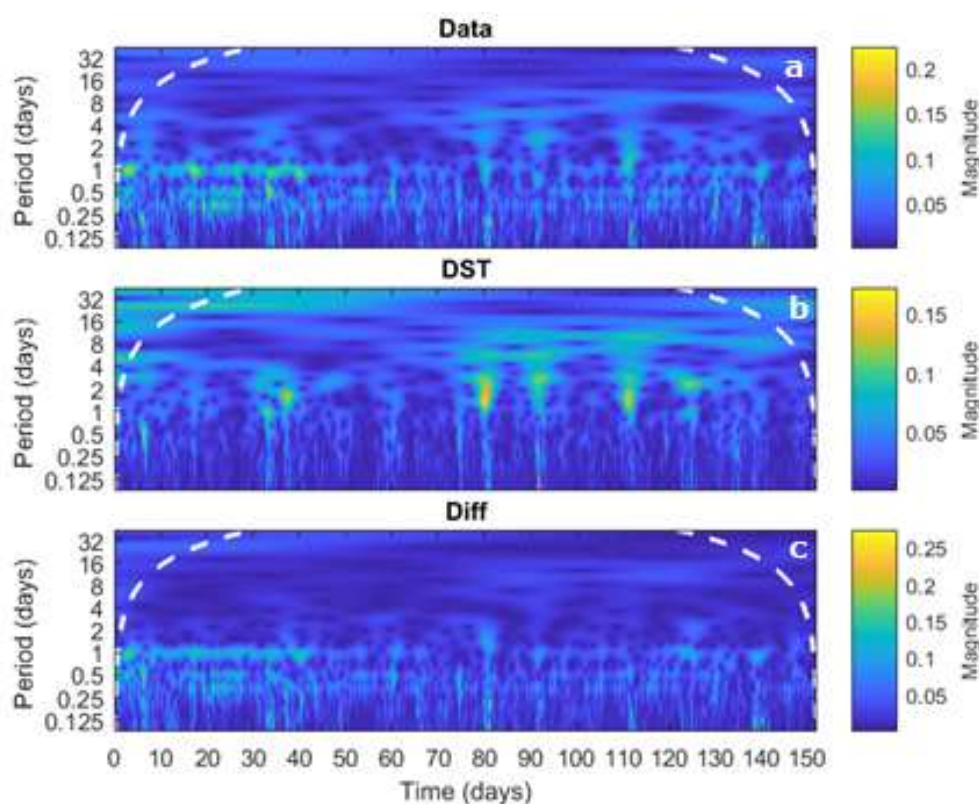
рядов *T* и *Dst* указывает на существование нескольких хорошо выраженных геомагнитных вариаций с периодами, равными 24, 144, 264, 366 и 744 часов или 1, 6, 11, 15.25 и 31 сутки, которые соответствуют наиболее высоким значимым коэффициентам автокорреляции (рис. 2) и определяются в основном гармониками периода вращения Солнца. Приведенные графики указывают на сходный характер изменения и идентичность структуры периодических составляющих временных рядов исследуемых параметров.



**Рис. 2.** Автокорреляционные функции вариаций параметров *T* и *Dst* со сдвигом от 0 до 40 суток (а) и фрагменты, соответствующие наиболее высоким значимым коэффициентам автокорреляции (b-d).

Согласно теории приливных колебаний скорости вращения Земли, основанной на теории лунно-солнечного приливного потенциала, наиболее значительными из них являются колебания с полумесячным и месячным периодами [25].

**Сравнительный анализ спектров.** Вейвлет-спектрограммы (рис. 3) временных рядов *T*, *Dst* и *Diff*, построенные для диапазона периодов 0.125-32 суток, демонстрируют изменение их частотных свойств во времени и динамику геомагнитных вариаций в анализируемый период.



**Рис. 3.** Динамика спектров вариаций полного вектора магнитного поля  $T$  (a) и индекса  $Dst$  (b) в период с 01 октября 2015 по 29 февраль 2016 г. Разность ( $Diff$ ) коэффициентов вейвлет-преобразования (c).

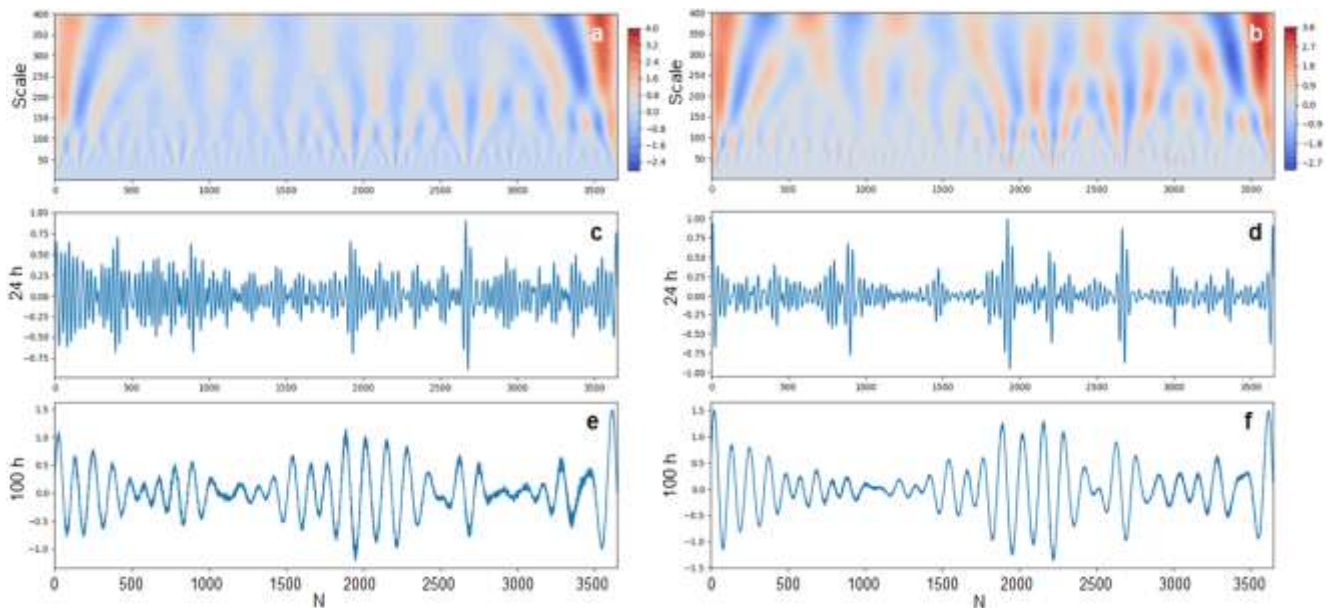
Одним из главных элементов изменения измеренного магнитного поля  $T$  являлись солнечно-суточные вариации ( $Sq$ ). Интенсивность суточных периодических вариаций, как видно на рисунке 3a, значительно изменялась во времени и более отчетливо выделялись в октябре и первой половине ноября. Использование вейвлет-преобразования позволило также детализировать спектр суточных вариаций  $T$  и выделить устойчивые колебания с периодами 8 и 12 часов.

Отмеченные ранее хорошо выраженные высокоамплитудные вариации во время магнитных бурь имели нерегулярный характер и проявлялись в широком диапазоне периодов от 0.125 до ~4 суток (рисунок 3b). Более высокочастотные компоненты магнитных бурь с периодами от суток и меньше изменялись в существенно меньшей степени.

Особенностью наблюдаемых периодичностей геомагнитных вариаций является их фрактальный ха-

рактер (рисунки 4 a, b) с хорошо выраженными линиями локальных максимумов и дроблением масштаба в распределении коэффициентов на независимые локальные максимумы, что свидетельствует о самоподобии и монофрактальности процесса [1].

С целью установления источников возмущений были проанализированы изменения во времени отдельных спектральных составляющих геомагнитных вариаций. В качестве примера на рисунках 4c-4f представлены изменения амплитуды спектральных составляющих с периодами 24 и 100 часов. Важно отметить, что поведение выделенных составляющих спектра магнитного поля с периодами, превышающими 100 часов (4-5 суток), показало достаточно высокую степень подобия вариаций  $T$  и  $Dst$  (рисунки 4e, f). Следовательно, локальная и региональная сейсмическая активность может, вероятно, проявляться в характерных особенностях геомагнитных вариаций, имеющих более короткие периоды.



**Рис. 4.** Модули коэффициентов вейвлет-преобразования геомагнитных вариаций  $T$  (a),  $Dst$ -индекса (b) и соответствующие вариации спектральных составляющих с периодами 24 часа (c, d) и 100 часов (e, f).

**Заключение.** Приведенные данные свидетельствуют, что в целом геомагнитные вариации и их отдельные спектральные составляющие сложным образом меняются во времени. Выявлена четкая периодичность вариаций магнитного поля, создаваемая гармониками периода вращения Солнца.

Для последующего установления возможных источников геомагнитных возмущений необходимо проанализировать изменение во времени отдельных спектральных составляющих геомагнитных вариаций в сопоставлении с изменениями сейсмической активности. При этом особый интерес должны, вероятно, вызывать регулярные полусуточные и суточные  $Sq$ -вариации. Во второй части статьи будут рассмотрены короткопериодные изменения магнитного поля Земли и то, как они соотносятся с геодинамическим процессом изменения сейсмической активности в регионе.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г.Бишкеке (тема №АААА-А19-119020190064-9)*

#### Литература:

1. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Особенности геомагнитных вариаций в центральной части Восточно-Европейской платформы. Физика Земли. - 2014. - №2. - С. 66-72.
2. Masci F., Palangio P., Di Persio M. Magnetic anomalies possibly linked to local low seismicity. Nat. Hazards Earth

Syst. Sci. 2009. 9. P. 1567-1572.

3. Chen C.-H., Liu J.-Y., Lin P.-Y., Yen H.-Y., Hattori K., Liang W.-T., Chen Y.-I., Yeh Y.-H., Zeng X. Pre-seismic geomagnetic anomaly and earthquake location. Tectonophysics. 2010. 489. P. 240-247.
4. Takla E.M.H., Yumoto K., Meloni A., Palangio P., Sutcliffe P.R., Nikiforov V., Marshall R. Possible Association between Geomagnetic Anomalies and the Tectonic Activity in Central Italy during 2002. Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2011. 185. 1-2. P. 29-35.
5. Рябова С.А. Геомагнитный эффект сильного землетрясения Тохоку 2011 года. Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - №4. - С. 137-151.
6. Bolzan M.J.A., Rosa R.R., Sahai Y. Multifractal analysis of low-latitude geomagnetic fluctuations. Ann. Geophys. 2009. 27. P. 569-576.
7. Вольхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. - М.: Наука. 1993. - 158 с.
8. Takla E.M., Yumoto K., Liu J.Y., Kakinami Y., Uozumi T., Abe S., Ikeda A. Anomalous Geomagnetic Variations Possibly Linked with the Taiwan Earthquake (Mw=6.4) on 19 December 2009. International Journal of Geophysics. V. 2011, 10 pages. doi:10.1155/2011/848467.
9. Oh S. Geomagnetic variation and its relation to micro earthquakes in the seismically inactive Korean Peninsula. Geosciences Journal. 2012. V. 16. №. 1. P. 47-58.
10. Kamiyama M., Sugito M., Kuse M., Schekotov A., Hayakawa M. On the precursors to the 2011 Tohoku earthquake: crustal movements and electromagnetic signatures. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2016. V. 7. №. 2. P. 471-492.
11. Stanica D.A., Stanica D., Błęcki J., Ernst T., Jozwiak W., Słominski J. Pre-seismic geomagnetic and ionosphere

- signatures related to the Mw 5.7 earthquake occurred in Vrancea zone on September 24, 2016. *Acta Geophysica*. 2018. 66. P. 167-177.
12. Hao Y.Q., Xiao Z., Zhang D.H. Teleseismic magnetic effects (TMDs) of 2011 Tohoku earthquake. *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2013. 118. P. 3914-3923.
  13. Отчет о НИР ИС РАН в г. Бишкеке. № 0155-2014-0003. 2014. 116 с.
  14. Пилипенко О.В., Захаров В.Г., Шаронова З.В. Структура вариаций геомагнитного поля, записанного в голоценовых озерных отложениях Европы. *Физика Земли*. 2004. №4. - С. 44-53.
  15. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Аномалии температуры атмосферы в периоды сильных землетрясений в 2003-2014 гг. / *Наука, новые технологии и инновации*. 2015. №3. - С. 16-19.
  16. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы. *Геосистемы переходных зон*. 2019. - Т. 3. - №1. - С. 19-26.
  17. Свердлик Л.Г. Короткопериодные вариации удельного электрического сопротивления Земной коры. *Вестник КРСУ*. 2019. - Т. 19. №4. - С. 143-149.
  18. URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>. (Дата обращения: 22.05.2019).
  19. Амиантов А.С., Зайцев А.Н., Одинцов В.И., Петров В.Г. Вариации магнитного поля Земли. База цифровых данных магнитных обсерваторий России за 1984-2000 годы. ИЗМИРАН. - Москва, 2001.
  20. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке.
  21. Gadre V.M., Dimri V.M., Chandrasekhar E. *Wavelets and fractals in earth system sciences*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Inc. 2014. 286 p.
  22. Мандрикова О.В., Богданов В.В., Соловьев И.С. Вейвлет-анализ данных магнитного поля Земли. *Геомагнетизм и Аэронавигация*. - 2013. - Т. 53. - №2. - С. 282-288.
  23. Садовский М.А., Нерсесов И.Л. Вопросы прогноза землетрясений. *Избранные труды*. - М: Наука. 2004. - С. 228-246.
  24. Kilifarska N., Nedialkov R., Velichkova T. Geomagnetic field variations due to active tectonic processes during period of lower solar and magnetospheric activity. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences*. 2015. Т. 68. V. 9. P. 1145-1152.
  25. Sidorenkov N.S. *The interaction between Earth's rotation and geophysical processes*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2009. 305 p.