

**ИНФОРМАЦИОННОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ГЕОМОНИТОРИНГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ТЫВЫ**

Кабанов Алексей Анатольевич

Аспирант, e-mail: weller86@inbox.ru,

Кругляков Алексей Сергеевич

Магистрант, e-mail: piggsy@gmail.com

Бадыма Севил Кечил-ооловна

Магистрант, e-mail: sevil.badyma@mail.ru

Пилимонкин Николай Сергеевич

Магистрант, e-mail: pilimonkin@mail.ru

Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Свободный пр., 79

Симонов Константин Васильевич

Доктор техн. наук, в.н.с., Институт вычислительного моделирования СО РАН, 660036,

Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44, e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Аннотация. Представлено информационное и алгоритмическое обеспечение для решения основных задач геомониторинга и оценки геодинамической опасности территории Республики Тыва. На основе данных сейсмического мониторинга в 2010-2017 гг. выполнена разработка элементов методики анализа данных комплексного геомониторинга геодинамических полей для оценки напряженно-деформированного состояния геосреды и повышения точности прогноза сильных землетрясений.

Ключевые слова: геомониторинг, землетрясения, предвестники, напряженно-деформированное состояние горных пород, оценка опасности.

Цитирование: Кабанов А.А., Кругляков А.С., Бадыма С.К., Пилимонкин Н.С., Симонов К.В. Информационное и алгоритмическое обеспечение геомониторинга землетрясений на территории Тывы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 125–132. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-11

Введение. Геодинамический мониторинг является обязательным элементом государственной системы обеспечения геодинамической безопасности в сейсмически активных регионах России [1–2, 5]. Начиная с 2000 г., получили развитие и региональные наблюдательные геодинамические сети в различных субъектах федерации (Красноярский край, Кемеровская область, республика Тыва и др.). При этом используются как сейсмологические сети, так и комплексные сети, регистрирующие различные геолого-геофизические поля и их параметры. В различных сейсмоактивных регионах России (Кавказ, Алтае-Саянская область, Камчатка, Сахалин) получили развитие геофизические полигоны для контроля напряжённо-деформированного состояния (НДС) геологической среды в промышленных зонах, включая крупные города, для прогноза сейсмической и геодинамической опасности. Идеология развития геодинамических полигонов базируется на комплексировании различных геолого-геофизических методов (сейсмология, электромагнитные измерения, ГГД мониторинг, мониторинг газов и т.д.).

Вместе с тем, несмотря на длительное использование комплекса геолого-геофизических методов, применяемых при геодинамическом мониторинге, нормативно-методическая основа упомянутого комплекса не разработана. В основном регламентированы такие виды геодинамического мониторинга, как ГГД мониторинг [5], также разработаны нормативные документы для организации и эксплуатации сейсмологических сетей в системе РАН [2]. В то же время электромагнитный мониторинг, в частности, на основе регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), осуществляется на основе авторских разработок [4]. Мониторинг радона и других газов осуществляется также на основе авторских разработок различных исследователей [3].

В статье анализируются некоторые данные комплекса геолого-геофизических методов (сейсмология, ЕИЭМПЗ, эмиссия радона) на геодинамических полигонах в Сибири, пригодные для оценки изменения НДС геологической среды и прогноза сильных сейсмических событий в регионе [6–7].

1. Анализ данных мониторинга естественного импульсного электромагнитного поля Земли. Природа ЕИЭМПЗ до сих пор вызывает дискуссии. Основатели метода [4], исследуя ЕИЭМПЗ в частотном диапазоне 10-20 кГц, пришли к выводу, что в спектре сигнала ЕИЭМПЗ присутствуют две основные составляющие: ионосферная (связанная с грозовой активностью и другими атмосферно-ионосферными процессами) и литосферная (имеющая механо-электромагнитную природу). В качестве основного источника ЕИЭМПЗ авторы рассматривают литосферную составляющую, связанную с волнами сжатия-растяжения литосферы (деформационные волны) под влиянием колебаний внутреннего ядра Земли.

Результаты геодинамического мониторинга (сейсмического, электромагнитного, газгидрогеохимического) на Алтае-Саянских (Красноярском и Тывинском) полигонах позволили выявить основной механизм формирования суточного хода ЕИЭМПЗ – волны сжатия-растяжения, связанные с гравитационными приливами в земной коре и литосфере. Эффекты изменения структуры ЕИЭМПЗ на стадии подготовки землетрясений проявляются как в краткосрочном (1-10 суток), так и среднесрочном (до двух месяцев) плане – нашли подтверждение в результатах геодинамического мониторинга в 2010-2017 гг. на полигонах АССО (рис. 1).

Следует учитывать, что в различных пунктах регистрации (в зависимости от особенностей геолого-тектонического строения и геодинамических режимов различных блоков земной коры) может наблюдаться различное по форме проявление краткосрочных признаков подготовки землетрясения в структуре суточных ходов ЕИЭМПЗ (вплоть до противофазных). Летом признаки подготовки землетрясений проявляются на фоне повышенного в целом уровне интенсивности ЕИЭМПЗ и поэтому их сложнее идентифицировать в качестве признаков подготовки землетрясения.

Аномальная структура ЕИЭМПЗ в АССО коррелируется с характером изменения концентрации радона в различных точках (Красноярск–Туманный–Аскиз–Кызыл). Регистрация радона в комплексе с геофизическими методами доказала свою эффективность в АССО для оценки НДС геологической среды. Подготовка слабых землетрясений (М около 3,0) также проявляется в структуре суточного хода ЕИЭМПЗ.

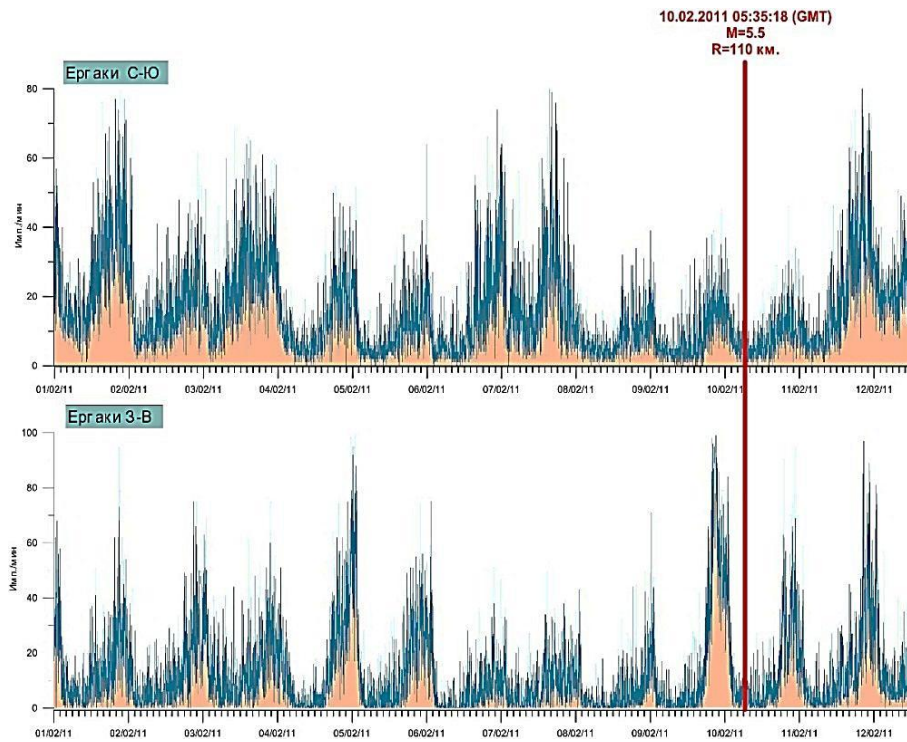


Рис. 1. Краткосрочный электромагнитный предвестник землетрясения в АССО, пункт наблюдения «Ергаки»

Таким образом, результаты геодинимического мониторинга в 2010-2017 гг. в Алтае-Саянском регионе подтвердили информативность ЕИЭМПЗ для прогноза изменений НДС геологической среды и в ряде случаев для прогноза землетрясений. Следует признать, что использование метода регистрации ЕИЭМПЗ без комплекса с другими (выше упомянутыми) методами, не позволяет однозначно давать оценку изменения НДС геологической среды и прогноз землетрясений. Отметим также, что при использовании имеющейся аппаратуры МГР-01 целесообразно на каждом пункте вести одновременную регистрацию ЕИЭМПЗ на одной «опорной» частоте (около 14 кГц), с различными коэффициентами усиления. Это позволит более надёжно идентифицировать сигналы литосферного происхождения на фоне влияния других видов источников (ионосферные, атмосферные и температурные шумы) [6].

Обработка данных МГР осуществляется с помощью Windows приложения MGR_Analiz. Данное приложение предназначено для визуализации, предварительной обработки и конвертации в текстовый формат данных, зарегистрированных многоканальным геофизическим регистратором МГР и его модификаций. Приложение работает с любой 32-х разрядной версией ОС Windows. Для установки приложения необходимо запустить дистрибутив программы, поставляемой в комплекте с МГР. В Windows XP можно устанавливать запись исполняемого файла на жесткий диск используемого компьютера.

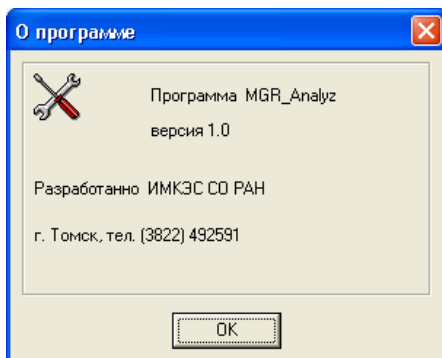


Рис. 2. Вид информационного окна «О программе»

При старте исполняемого файла приложения появляется модальное информационное окно «О программе» с номером версии программы и телефонами разработчика. Вид информационного окна приведен на рисунке 2. Интерфейс приложения MGR_Analiz выполнен в

виде одиннадцатистраничной записной книжки (рис. 3).

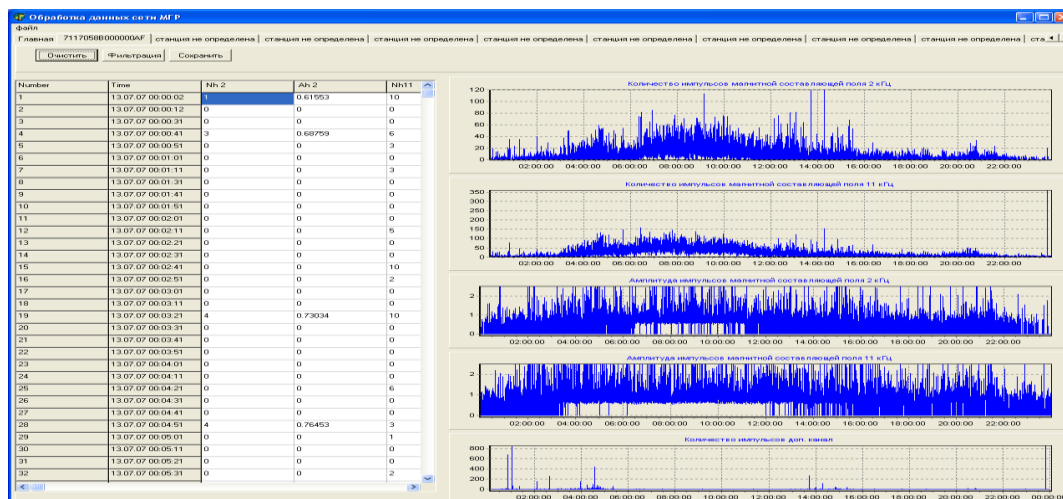


Рис. 3. Вид рабочего окна приложения MGR_Analiz

Страницы 2-11 служат для визуализации, первичной обработки и сохранения в текстовом виде в них данных МГР. На каждой из этих страниц могут быть открыты данные только одного регистратора. Первая страница с закладкой «Главная» - для визуализации и сохранения данных любого канала из открытых данных на страницах 2-11.

По результатам мониторинга электромагнитных полей на Алтае-Саянских полигонах можно сделать вывод, что данный метод позволяет осуществлять среднесрочный (до нескольких месяцев) и краткосрочный (от нескольких суток до нескольких часов) прогноз землетрясений. Предвестники проявляются в виде различных аномалий в структуре ЕИЭМПЗ: резком увеличении или снижении интенсивности импульсного потока, нарушении типичного для данного пункта суточного хода, аномального изменения сезонного тренда.

Интенсивность проявления предвестника и его заблаговременность связаны с энергией землетрясения, расстоянием и строением геологической среды между пунктом регистрации и гипоцентром. Перед относительно слабыми землетрясениями аномалии в структуре суточных ходов в виде резкого увеличения количества импульсов выделяются за несколько суток или часов до сейсмического события.

2. Анализ данных мониторинга уровня концентрации радона. Мониторинг радона в 2003-2017 гг. проводился в Алтае-Саянском регионе, где подтвердил свою эффективность в комплексе с другими геофизическими методами контроля НДС геологической среды. Характер изменения концентрации радона в пределах Алтае-Саянского геодинамического полигона связан также с длиннопериодными (3-6 месяцев) циклами гравитационных приливов. Радоновые предвестники подготовки сильного землетрясения проявляются в положительных или отрицательных аномалиях уровня радона в подземных водах [3].

Мониторинг содержания радона в подземных водах выполняется с целью выявления средне- и краткосрочных (месяц, 2-10 дней) предвестников сильных землетрясений $M > 5.0-6.0$ и оценки изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе анализа связи динамики колебаний концентрации радона в связи с сейсмической активностью региона.

Оценки аномалий могут определяться тремя способами: по величине абсолютного максимального отклонения от средне-фоновой концентрации ($C_{экс} - C_{ф}$); по величине

относительного максимального отклонения ($C_{\text{ЭКС}} - C_{\text{ф}} / C_{\text{ЭКС}}$); по числу среднеквадратичных отклонений для фоновых концентраций ($C_{\text{ЭКС}} - C_{\text{ф}} / S_{\text{ф}}$).

Оценка предвестника подготовки землетрясений 2011-2012 гг. Эмиссия радона изменилась за 5-10 суток перед землетрясением во всех четырёх пунктах наблюдения Алтае-Саянского региона. Наиболее чётко предвестник проявился на п.н. Кызыл в 100 км от эпицентра землетрясения. За 4 суток до основного события в уровне концентрации радона наблюдалась аномалия, выраженная резким повышением уровня. Проведен численный анализ изменения концентрации радона в подземных водах. На этой основе выполнен анализ предвестников подготовки землетрясений в Каа-Хемском районе республики Тыва 27 декабря 2011 г. магнитудой 6.5 и 26 февраля 2012 г. магнитудой 6.7. Получены следующие результаты (рис. 4-5).

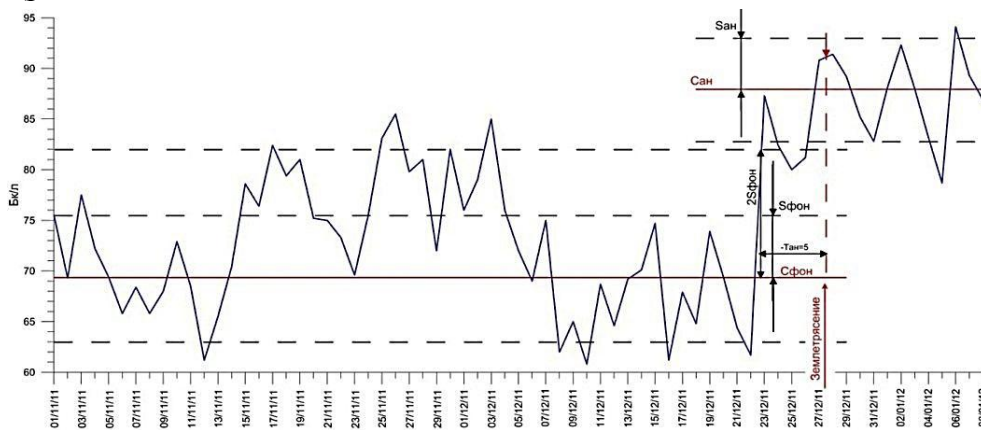


Рис. 4. Анализ измерений радоновых аномалий на примере Каа-Хемского землетрясения 27 декабря 2011 г. с магнитудой 6.5

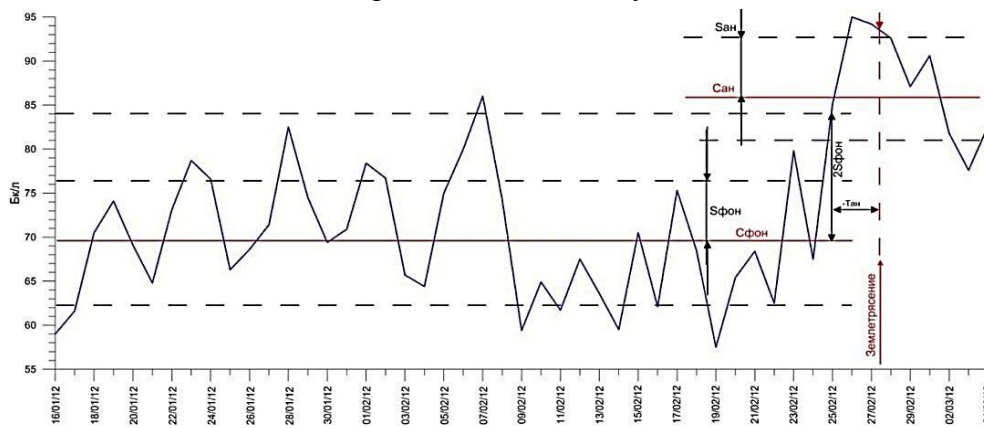


Рис. 5. Анализ измерений радоновых аномалий на примере Каа-Хемского землетрясения 26 февраля 2012 г. с магнитудой 6.7

Во время подготовки первого землетрясения средне-фоновая концентрация радона была на уровне 69.6, тогда как среднее значение концентрации радона в аномальный период составила 88.2. Время предвестниковой радоновой аномалии оценивалось от начала устойчивого повышения концентрации радона величины $2 * S_{\text{фон}}$ (среднеквадратичное отклонение фоновых концентраций) до момента землетрясения и составило 5 суток.

Во время подготовки второго землетрясения средне-фоновая концентрация радона была на уровне 69.6, тогда как среднее значение концентрации радона в аномальный период составила 86.0. Время предвестниковой радоновой аномалии оценивалось от начала

устойчивого повышения концентрации радона величины $2 \cdot S_{\text{фон}}$ (среднеквадратичное отклонение фоновых концентраций) до момента землетрясения и составило 3 суток. Расчёты проводились по данным пункта измерения «Кызыл», расстояние до очагов землетрясений составляет около 100 км.

Таким образом, изменения концентрации радона в естественных водных источниках позволяют, в комплексе с данными ЕИЭМПЗ, сейсмической эмиссии прогнозировать не только изменение НДС геологической среды, но также обеспечить среднесрочный (1-3 месяца) прогноз сильных сейсмических событий $M \geq 6.0$. Краткосрочный (1-3 суток) прогноз тоже возможен, но без комплексирования с другими методами (сейсмический и ЕИЭМПЗ) достоверность интерпретации локальных аномалий радона при редкой сети наблюдений не позволяет уверенно прогнозировать даже сильные землетрясения ($M \geq 5.0$).

Заключение. Геодинамический мониторинг комплексом геолого-геофизических методов (сейсмология, ЕИЭМПЗ, радон) обеспечивает не только оценку изменения НДС геологической среды, но также среднесрочный (1-3 месяца) и краткосрочный (1-10 суток) прогноз сильных землетрясений с $M \geq 5.0$. В то же время уровень комплексирования (низкая плотность сетей регистрации ЕИЭМПЗ и измерения уровня концентрации радона в подземных водах) не обеспечивает в регионе надёжный прогноз положения эпицентра.

Для повышения надёжности определения положения эпицентров землетрясений необходимо увеличить плотность сетей регистрации ЕИЭМПЗ и радона, а также дополнить применяемый геолого-геофизический комплекс данными спутниковых съёмок (инфракрасной и геохимической (CO_2 , метан)). В связи с распространением в геологической среде наряду с высокоскоростными волнами сейсмического диапазона (скорость 5-7 км/сек), медленных волн деформации (1-2 км/час и менее) необходимо проектировать геодинамические полигоны для мониторинга и медленных волн деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 22.1.06-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Общие требования. Введ. 2000-01-01. М.: Изд-во стандартов. 1999. 25 с.
2. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. М.: Наука. 1982. 272 с.
3. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105.
4. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная взаимосвязь с движением ядра Земли // Геология и Геофизика. 2009. Т. 50. С. 152–172.
5. Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система RE-STEPS). Составители: Г.С. Вартанян, В.С. Гончаров, В.П. Кривошеев, Э.П. Потемка, С.К. Стажило-Алексеев. М.: ВСЕГИНГЕО, 2000. 83 с.
6. Сибгатулин В.Г., Хлебопрос Р.Г., Перетокин С.А., Кабанов А.А. Экологическая и инженерная геология: синергия процессов в сейсмических очагах и краткосрочный прогноз землетрясений // Инженерная экология. 2009. № 2. С. 32–42.
7. Соболев Г.А. Понамарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. Москва: Наука. 2003. 270 с.

**INFORMATION AND ALGORITHMIC PROVISION OF EARTHQUAKE
GEOMONITORING IN THE TYVA TERRITORY**

Aleksey A. Kabanov

Postgraduate student, e-mail: weller86@inbox.ru,

Alexey S. Kruglyakov

Master of Science, e-mail: piggsyy@gmail.com

Sevil K. Badima

Master of Science, e-mail: sevil.badyma@mail.ru

Nikolai S. Pilimonkin

Master of Science, e-mail: pilimonkin@mail.ru

Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79

Konstantin V. Simonov

Doctor of Techn. Sci., Leading Researcher, Institute of Computational Modeling SB RAS,

660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, p. 44

e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Abstract. Information and algorithmic support for solving the main tasks of geomonitoring and assessment of the geodynamic danger of the territory of the Republic of Tyva are presented. Based on seismic monitoring data in 2010-2017 the development of elements of the method of data analysis of complex geomonitoring of geodynamic fields for the assessment of the geological environment and the accuracy of the forecast of strong earthquakes.

Key words: geomonitoring, earthquakes, precursors, stress-strain state of rocks, hazard assessment.

References

1. GOST R 22.1.06-99. Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh. Monitoring i prognozirovaniye opasnykh geologicheskikh yavleniy i protsessov. Obshchiye trebovaniya. – Vvedon 2000-01-01. [GOST R 22.1.06-99. Safety in emergency situations. Monitoring and forecasting of dangerous geological phenomena and processes. General requirements. – It is entered 2000-01-01]. Moscow. Izdatel'stvo standartov = Publishing house of standards. 1999. 25 p. (in Russian)
2. Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh Yedinoy sistemy seysmicheskikh nablyudeniy SSSR [Instruction on the procedure for the production and processing of observations at seismic stations of the Unified System of Seismic Observations of the USSR]. Moscow. Nauka = Science. 1982. 272 p. (in Russian)
3. Zubkov S.I. Radonovyye predvestniki zemletryaseniy [Radon precursors of earthquakes] // Vulkanologiya i seysmologiya = Volcanology and seismology. 1981. No. 6. Pp. 74–105. (in Russian)
4. Malyshkov Yu.P., Malyshkov S.Yu. Periodicheskiye variatsii geofizicheskikh poley i seysmichnosti, ikh vozmozhnaya vzaimosvyaz' s dvizheniyem yadra Zemli [Periodic variations of geophysical fields and seismicity, their possible interrelation with the motion of the Earth's

- core] // *Geologiya i Geofizika = Geology and Geophysics*. 2009. Т. 50. Pp. 152–172. (in Russian)
5. Metodicheskiye ukazaniya po vedeniyu gidrogeodeformatsionnogo monitoringa dlya tseley seysmoproгноza (sistema RE-STEPS) [Methodological instructions for conducting hydrodeformation monitoring for seismic forecasting purposes (RE-STEPS system). Compiled by G.S. Vartanyan, V.S. Goncharov, V.P. Krivosheev, E.P. Potemka, S.K. Trainee-Alekseev]. Moscow. VSEGINGEO. 2000. 83 p. (in Russian)
 6. Sibgatulin V.G., Khlebopros R.G., Peretokin S.A., Kabanov A.A. *Ekologicheskaya i inzhenernaya geologiya: sinergiya protsessov v seysmicheskikh ochagakh i kratkosrochnyy prognoz zemletryaseniy* [Ecological and engineering geology: synergy of processes in seismic sources and short-term forecast of earthquakes] // *Inzhenernaya ekologiya = Engineering ecology*. 2009. No. 2. Pp. 32–42. (in Russian)
 7. Sobolev G.A. Ponamarev A.V. *Fizika zemletryaseniy i predvestniki* [The physics of earthquakes and precursors]. Moscow. Nauka = Science. 2003. 270 p. (in Russian)