

УДК 551.550; 524.1; 551.521.64

ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВАРИАЦИЯХ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И В ИНТЕНСИВНОСТИ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ НА ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ ТЯНЬ-ШАНЯ

Антонова В.П., Крюков С.В., Луценко В.Ю., Малимбаев А.М.

*Институт ионосферы Национального Центра космических исследований и технологий,
г. Алматы, Казахстан, valanta@rambler.ru*

Введение

Алматы окружен рядом потенциальных источников сильных землетрясений, поэтому проблема диагностики и прогноза сейсмической активности всегда была и будет актуальной для жителей города и его окрестностей. Сейсмические наблюдения в Казахстане осуществляются двумя организациями: Сейсмологической опытно-методической экспедицией Министерства образования и науки, СОМЭ МОН, и Институтом геофизических исследований Национального ядерного центра Министерства энергетики и минеральных ресурсов, ИГИ НЯЦ [5]. Локальная система сейсмологического мониторинга наиболее насыщена пунктами регистрации в районе города Алматы.

Считается, что наиболее изучены геофизические предвестники землетрясений, т.е. предвестники, связанные с закономерным поведением различных геофизических полей на разных этапах подготовки землетрясения. Однако, *ни один из предвестников не даёт достаточно высокого вероятного прогноза — лучшие из них дают вероятность не более 50%. Поэтому вероятностный прогноз можно делать только на основе их комплексного анализа* [8]. Обнаруженные аномальные эффекты в вариациях напряженности электрического поля накануне землетрясений стимулировали в сейсмически активных регионах мира (Япония, Китай, Россия) интенсивное изучение динамических характеристик электрического поля для использования их особенностей в прогнозе землетрясений.

Интерес к измерениям тепловых нейтронов возрос после обнаружения их всплесков на Памире и на Тянь-Шане во время экстремального гравитационного воздействия на земную кору со стороны Луны и Солнца (новолуние, полнолуние, солнечные затмения) [1, 12]. Полагается, что земная кора, испытывая механическое воздействие, вытесняет запасы радиоактивных газов изотопов радона. В процессе радиоактивного распада образуются альфа-частицы, которые взаимодействуют с ядрами элементов земной коры и воздуха с возникновением нейтронов. С другой стороны, при механических воздействиях на материалы происходит нарушение связей между молекулами вещества, образование микротрещин, возникновение сильного электрического поля между разъединяемыми поверхностями с эмиссией различных излучений (механоэмиссия). Стационарная установка по регистрации тепловых нейтронов на высокогорной Тянь-Шаньской станции космических лучей (3340 м над уровнем моря, 43.2N; 76.6E) была создана и запущена в эксплуатацию в ноябре 2006 г. Экспериментальный комплекс предназначался для исследования динамических процессов в грозовой атмосфере, их связи с космическими лучами, а также для решения ряда других актуальных задач современной геофизики [2]. Расположение установок в сейсмически активном районе вблизи разлома земной коры позволило провести исследования измеряемых геофизических параметров в периоды активизации сейсмических процессов с целью выявления предвестников землетрясений. В каталог выборочных сейсмических событий для анализа были включены 30 землетрясений произошедших, главным образом, в окрестности 140 км от г. Алматы с интенсивностью ≥ 3 б. При формировании каталога использовалась информация, представленная на сайте ИГИ НЯЦ РК (<http://www.kndc.kz>).

Экспериментальный комплекс

Комплексная система регистрации атмосферного электрического поля «ELIS-TS» состоит из двух датчиков. Один датчик чувствителен к высокочастотной переменной компоненте электрического поля, возникающей в грозовой атмосфере, а другой – к медленной квазистатической компоненте E_z (вертикальная составляющая поля). По принципу действия второй датчик – это электростатический флюксметр (антенна «field mill» – вертушка). Конструктивно антенное устройство помещено в водонепроницаемый корпус «пластинами вниз» с целью ослабления влияния осадков на работу прибора. Прибор обеспечивает измерение электрического поля в диапазоне ± 50 кВ/м, чувствительность – 10 В/м, временное разрешение равно 0.05 с.

Детектор тепловых нейтронов, DTN, состоит из двух модулей. Каждый модуль содержит 6 пропорциональных счетчиков наполненных смесью газов гелия-3 и аргона под давлением 2 атм. Длина счетчиков ~ 1 м, диаметр трубки – 3 см, рабочее напряжение – 1600 В. Эффективность регистрации тепловых нейтронов $\sim 60\%$. Один модуль, DTN1, установлен рядом с нейтронным монитором 18NM64. Второй модуль, DTN2, установлен в 10 м от здания в легком фанерном контейнере на высоте ~ 30 см от грунта. Скорость счета модуля, установленного внутри здания, $\sim 6.8 \cdot 10^4$ имп/ч, а внешнего $\sim 4.9 \cdot 10^4$ имп/ч, временное разрешение – 10 сек.

Детектор высокоэнергичных нейтронов, – это стандартный нейтронный монитор 18NM64, регистрирующий нейтроны высоких энергий галактического происхождения с высокой статистической точностью.

Предвестники землетрясений в вариациях атмосферного электрического поля

Известно, что на регистрируемые вариации приземного электрического поля сильно влияют метеорологические условия: осадки в виде дождя и снегопада, туман, гроза, которые могут маскировать возмущения литосферного происхождения. Поэтому изучение вариаций электрического поля в разных метеорологических условиях являлось необходимым этапом для того, чтобы идентифицировать источники возмущений, обусловленные активизацией сейсмических процессов [3]. Мы использовали опыт их выявления в сейсмоактивных регионах мира, включая Камчатку [9, 11]. Во время серии землетрясений в окрестности г. Алма-Аты на высокогорной станции были зарегистрированы аномальные вариации электрического поля которые не соответствовали наблюдаемым метеорологическим условиям хорошей погоды. В течение всего периода наблюдений особо можно выделить два значительных события: серия землетрясений 1–2 мая 2011 г и 28 января 2013 г. На рис. 1 приведены типичные значения электрического поля во время «хорошей погоды», накануне и во время землетрясений 01.05.2011 г.

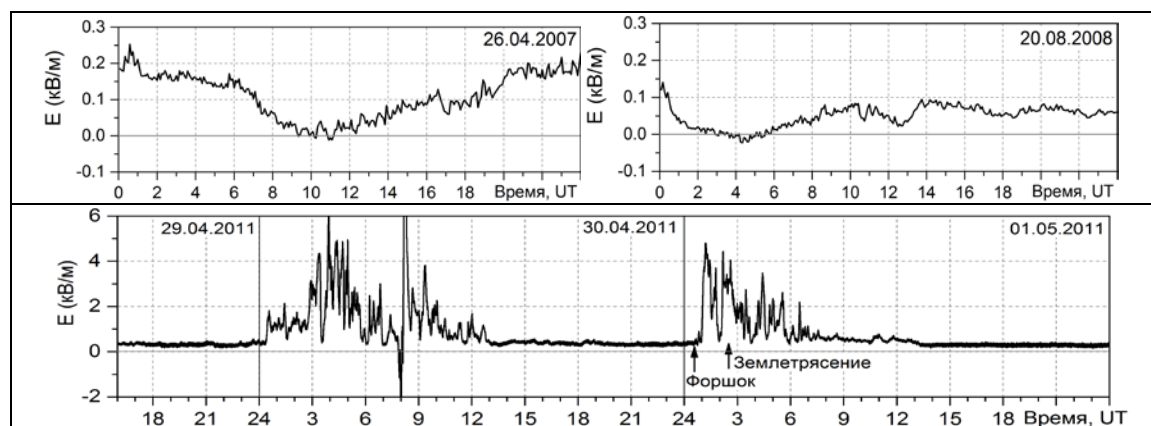


Рис. 1. Значения электрического поля во время «хорошей погоды» (верхняя панель), накануне и во время серии землетрясений 1 мая 2011 г. (нижняя панель)

Суточные вариации атмосферного электрического поля в условиях «хорошей погоды» на высокогорной станции не превышают 100–200 В/м. Вариации электрического поля превышающие 6 кВ/м, представленные на нижней панели, наблюдаются только в грозовой атмосфере. Однако, в этот период соблюдались условия хорошей погоды. Поэтому логично связать аномальные поля с землетрясениями. По данным ИГИ НЯЦ РК за двое суток 1–2 мая 2011 г насчитывалось более 8 толчков от землетрясений с магнитудой ~ 4.0 и более. Основной толчок с магнитудой 5.4 был 1 мая в 02:31 UT. За 2.5 часа до него был зафиксирован форшок с $K = 5.8$. После землетрясения следовала серия аномально высоких афтершоков. Второго мая начало аномальных вариаций электрического поля совпадает с началом землетрясения, что подтверждает вывод о литосферном происхождении источника возмущений. Чрезвычайно важным фактом для прогноза землетрясений является то, что длительные аномальные вариации регистрируются и накануне землетрясения; 28 и 30 апреля 2011 г., а также за 1.5 часа до главного толчка землетрясения. Их длительность составляет 5–7 часов 28 апреля и более 12 часов 30 апреля и 1 мая. На рис. 2 представлены типичные спектры мощности вариаций электрического поля, $G(f)$, рассчитанные по методу Блэкмана-Тьюки [7], в сейсмически спокойных условиях, во время землетрясений и перед ним с аномальными значениями поля в диапазонах: $(10^{-4}–10^{-3})$ Гц, $(10^{-3}–10^{-2})$ Гц, $(10^{-1}–1)$ Гц. При сравнении можно отметить, что

спектральный состав вариаций электрического поля в представленных диапазонах значительно не меняется. Исключением является 1 мая. После главного толчка землетрясения устойчивый 5-секундный пик расщепляется на два (4-й спектр рис. 2).

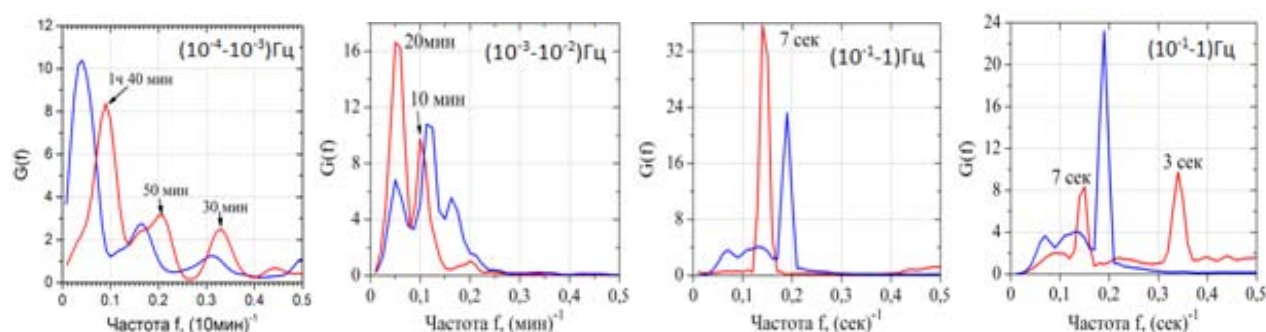


Рис. 2. Нормированные спектры мощности аномальных вариаций электрического поля (красный цвет) и в сейсмически спокойных условиях (синий цвет линий) в 3-х диапазонах

Значительные аномальные изменения квазистатического электрического поля с амплитудой $\sim \pm 2$ кВ/м зарегистрированы за 20 часов перед землетрясением 28 января 2013 г. Землетрясение произошло в 230 км к востоку от г. Алматы. Энергетический класс 15.3, глубина 10 км, магнитуда 6.1. Землетрясение ощущалось в Алматы с интенсивностью 4–5 балла. В этом событии наблюдалось два типа аномалий. Первый тип характеризуется знакопеременными значениями поля. Второй тип аналогичен характеру аномалий накануне и во время землетрясений 1–2 мая 2011 г. Помимо рассмотренных, аномальные вариации положительной полярности зарегистрированы накануне двух слабых землетрясений, но с эпицентром в непосредственной близости от точки наблюдения поля. Продолжительность аномалий в обоих событиях – не менее 6 часов.

Предвестники землетрясений в вариациях тепловых нейтронов

С 1973 г. на высокогорной станции проводится регистрация высокоэнергичных нейтронов стандартным монитором 18NM64. Размещение установок на одной площадке дает возможность сравнивать вариации интенсивности тепловых нейтронов с хорошо изученными вариациями высокоэнергичных нейтронов галактического происхождения для выделения изменений литосферного происхождения. В работе [4] было показано, что в отсутствие сейсмической активности вариации тепловых нейтронов на поверхности земли имеют ту же природу, что и высокоэнергичные. Однако, во время активизации сейсмических процессов синхронность вариаций интенсивности тепловых нейтронов (DTN2) и высокоэнергичных (18NM64) нарушается, рис. 3.

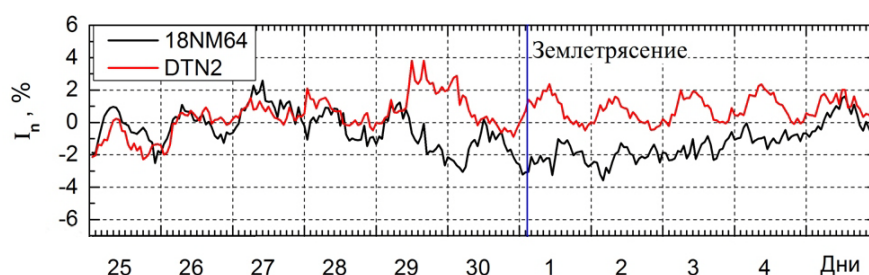


Рис. 3. Вариации тепловых (DTN2) и высокоэнергичных (18NM64) нейтронов с 25 апреля по 5 мая 2011 г. Момент главного толчка землетрясения 1 мая 2011 г отмечен вертикальной линией.

Учитывая, что вариации атмосферного и межпланетного происхождения в детекторах тепловых нейтронов подобны вариациям данных нейтронного монитора, исключим их, следуя разработанной нами методике, для выделения изменений литосферного происхождения. На рис. 4 представлены результаты расчетов для трех периодов, сопровождавшихся землетрясениями 25.12.2006, 08.04.2009 и 28.01.2013 г. Момент землетрясения отображен вертикальной линией. На этих графиках отсутствуют низкочастотные тренды, суточные вариации, но значительное возрастание потока тепловых нейтронов накануне землетрясения или сразу после него очевидно. Установлено, что повышением интенсивности тепловых нейтронов сопровождается $\sim 60\%$ землетрясений, но накануне землетрясений таких событий значительно меньше, $\sim 25\text{--}30\%$. Вывод

авторов [12] о возможности использовать регистрацию тепловых нейтронов для диагностики и прогноза землетрясений подтверждается. Однако необходимым условием для этого является синхронная регистрация высокоэнергичных нейтронов.

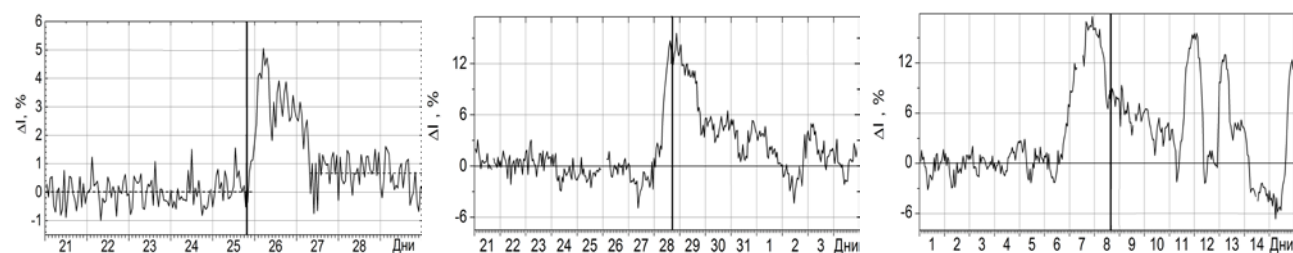


Рис. 4. Вариации интенсивности тепловых нейтронов литосферного происхождения во время сейсмической активности 25.12.2006, 08.04.2009 и 28.01.2013 г. Вертикальная линия – момент землетрясения

Выявление периодических вариаций тепловых нейтронов проводилось в низкочастотных диапазонах ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц и ($7 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-5}$) Гц. Именно в этих диапазонах расположен спектр наиболее известных вариаций высокоэнергичных нейтронов галактического происхождения: суточные, 27-дневные. В данных Тянь-Шаньской станции суточная вариация хорошо проявляется как в интенсивности высокоэнергичных нейтронов, так и в интенсивности тепловых нейтронов в диапазоне ($7 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-5}$) Гц, что свидетельствует о их генетической связи. В диапазоне ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц известной спектральной составляющей в интенсивности космических лучей является 27-дневная вариация. Она обусловлена вращением Солнца и неоднородностью долготного распределения активных образований на Солнце. На всем исследуемом интервале 24 цикла солнечной активности, 2009 ÷ 2018 гг., 27-дневная периодичность в интенсивности высокоэнергичных нейтронов, регистрируемых на станции, явным образом не проявлялась. Ее отсутствие объясняется чрезвычайно низкой солнечной активностью всего 24 цикла.

В интенсивности тепловых нейтронов в диапазоне ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц в распределении спектральной плотности выявляется устойчивый пик на частоте, соответствующей периоду 29.5 суток (синодический, лунный месяц). В этом диапазоне он является доминирующим на всем периоде измерений и обусловлен гравитационным влиянием Луны. Разность полных годовых путей Луны и Солнца, приведенных к одному времени, дает длительность среднего синодического обращения Луны, или лунного месяца, 29.531 дня, в течение которого Луна возвращается в свое предыдущее положение относительно Солнца. В интенсивности высокоэнергичных нейтронов данная вариация не выявляется на всем исследуемом периоде, что свидетельствует о дополнительном, внутреннем источнике тепловых нейтронов (земная кора).

На рис. 5 выборочно представлены спектры мощности вариаций тепловых (детектор ДТН1) и высокоэнергичных нейтронов (18NM64) в диапазоне ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц. Устойчивость пиков проверена методом «качания частоты» с применением 3-х низкочастотных фильтров разной длины. В спектрах мощности вариаций тепловых нейтронов спектральный пик, соответствующий синодическому месяцу, устойчив в отличие от низкочастотных пиков в спектрах вариаций высокоэнергичных нейтронов.

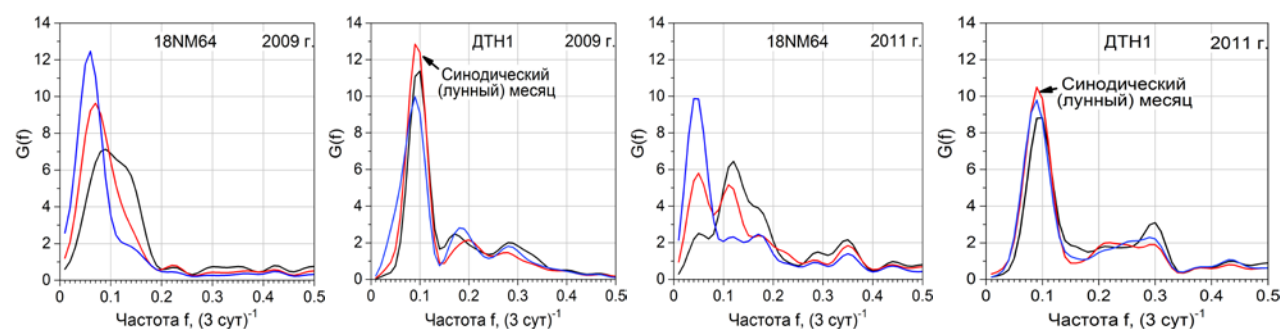


Рис. 5. Нормированные спектры мощности вариаций тепловых нейтронов (детектор ДТН1) и высокоэнергичных (18NM64) в диапазоне ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц

Для определения амплитуды выявленной вариации с периодом 29.5 суток в интенсивности тепловых нейтронов применен метод комплексной демодуляции сигнала [10]. На рис. 6 представлены

результаты расчетов амплитуды этой вариации за три года. В течение этого периода она варьирует в пределах $\pm 0.9\%$ от среднего с явной полугодовой периодичностью.

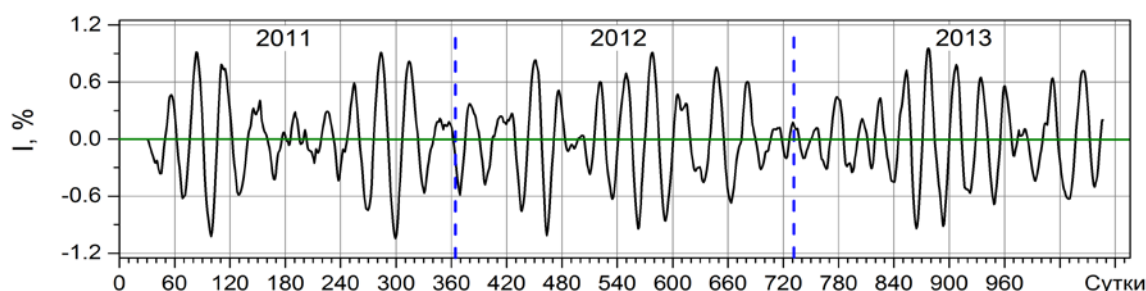


Рис. 6. Временная развертка периодичности 29.5 суток в интенсивности тепловых нейтронов за 2011-2013 гг.

Сотрудниками НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова отмечалась корреляция между всплесками тепловых нейтронов, фазами Луны и сейсмической активностью в Тихоокеанском сейсмическом кольце [6]. Анализ составленного нами каталога землетрясений в окрестности г. Алматы с интенсивностью ≥ 3 баллов, показал, что 70% этих событий произошло во время полнолуния или новолуния ($\pm 1 \div 2$ дня).

Заключение

Исследование регистрируемых геофизических параметров на высокогорной станции Тянь-Шаня, расположенной вблизи разлома коры, во время активизации сейсмических процессов показало, что два параметра (Ez-компонента атмосферного электрического поля и интенсивность тепловых нейтронов) могут использоваться при прогнозировании землетрясений. Препятствующим фактором для использования вариаций электрического поля является грозовая активность. Для тепловых нейтронов необходимым условием является одновременная регистрация высокоэнергичных нейтронов для выделения вариаций литосферного происхождения. Рекомендуется при прогнозировании учитывать также усиление гравитационного воздействия Луны во время полнолуний и новолуний.

Список литературы

1. Антонова В.П., Володичев Н.Н., Крюков С.В., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. Отклик солнечных затмений в вариациях потока нейтронов на Земле // Известия РАН, Сер. Физическая. 2007. № 7. С. 1082–1085.
2. Антонова В.П., Дробжев В.И., Крюков С.В. Организация наземных экспериментов по регистрации квазистатического электрического поля и высокочастотных флуктуаций поля от молниевых разрядов // Казахстанские космические эксперименты. Алматы. 2007. С. 42–50.
3. Антонова В.П., Дробжев В.И., Шлюгаев Ю.В. Наблюдения вариаций электрического поля на Тянь-Шане в разных геофизических условиях // Труды VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. Санкт Петербург. 2012. С. 29–30.
4. Антонова В.П., Володичев Н.Н., Крюков С.В., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. Результаты детектирования тепловых нейтронов на Тянь-Шаньской станции // Геомагнетизм и Аэрономия. 2009. Т. 49. № 6. С. 798–804.
5. Бейсембаев Р.Т., Ли А.Н., Калмыкова Н.А., Неверова Н.П., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н. Казахстан // Землетрясения Северной Евразии. Обнинск. ГС РАН. 2010. С. 130–141.
6. Володичев Н.Н., Сигаева Е.А. Нейтроны от поверхности Земли, обусловленные лунными и солнечными приливами, и сейсмичность Земли // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2017. № 6. С. 94–98.
7. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып.1, 2. М.: Мир, 1971. 287 с.
8. Завьялов А.Д. Прогноз землетрясений: состояние проблемы и пути решения // Земля и Вселенная. 2018. № 5. С. 66–79.
9. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.И., Капустина О.В., Дегуева А.Х., Бузевич А.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э., Фирстов П.П. Вариации различных атмосферно-ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. № 6. С. 805–813.
10. Привальский В.Е., Панченков В.А., Асарина Е.Ю. Модели временных рядов с приложениями в гидрологии // СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 266 с.
11. Смирнов С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 45. № 2. 2005. С. 282–287.
12. Volodichev N.N., Zakharov V.A., Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu., Podorolski A.N., Chubenko A.P., Shepetov A.L. and V.P. Antonova. The flows of neutrons of space radiation and from terrestrial crust. // Proc. of 27th ICRC. Germany. Hamburg. 2001. С. 4204–4207.