

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.54-57

## В.А. ТРОИЦКАЯ КАК СОЗДАТЕЛЬ РОССИЙСКОЙ ШКОЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

Н.Г. Клейменова

*Институт физики Земли (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия*

**Аннотация.** В прошлом году исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося ученого-геофизика Валерии Алексеевны Троицкой (1917-2010) - создателя российской школы по изучению геомагнитных пульсаций как фундаментального естественного процесса магнитосферной плазмы. Первые работы В.А. Троицкой были опубликованы в начале 50-х годов прошлого столетия, и ни один из полученных ею результатов не потерял актуальности в наши дни. Зарубежные коллеги называли её «королевой геомагнитных пульсаций». Только благодаря активным действиям и авторитету В.А. Троицкой стало возможным проведение систематических синхронных международных геомагнитных наблюдений в сопряженных точках Согра-Кергелен, а также на геомагнитных полюсах Восток-Туле. Анализ этих наблюдений позволил по-новому подойти к вопросам генерации и распространения геомагнитных пульсаций в околоземном пространстве. Экспериментально было установлено, что большая часть короткопериодных геомагнитных колебаний возбуждается в экваториальной плоскости магнитосферы и распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля. В то же время было найдено, волновые пакеты геомагнитных пульсаций  $Pc1$  ( $f = 0.2-5$  Гц), поэтически названные «жемчужинами», в северном и южном полушариях регистрируются попеременно, а не одновременно, как наблюдаемые в том же диапазоне частот колебания убывающего периода (КУП). В.А. Троицкой и её учениками было создано новое направление в геофизике – диагностика состояния магнитосферы на основе наземных наблюдений геомагнитных пульсаций. Таким образом, был создан фундамент для дальнейших как экспериментальных, так и теоретических исследований, которые показали, что геомагнитные пульсации играют ключевую роль в динамике магнитосферной плазмы, что подтверждено многочисленными публикациями последних лет.



*Валерия Алексеевна Троицкая  
“QUEEN OF GEOMAGNETIC PULSATIONS”-  
так называли ее финские коллеги*

### 1. Введение

То, что в магнитном поле Земли могут наблюдаться быстрые вариации, было известно с началом регулярных геомагнитных наблюдений, однако слишком низкая чувствительность используемой в то время аппаратуры не позволяла их исследовать. Но уже в 30-х годах прошлого века, при значительном увеличении чувствительности приемников в скандинавских обсерваториях Тромсё и Соданкюля, были зарегистрированы колебания с периодами в несколько секунд [Harang, 1932; Sucksdorff, 1936].

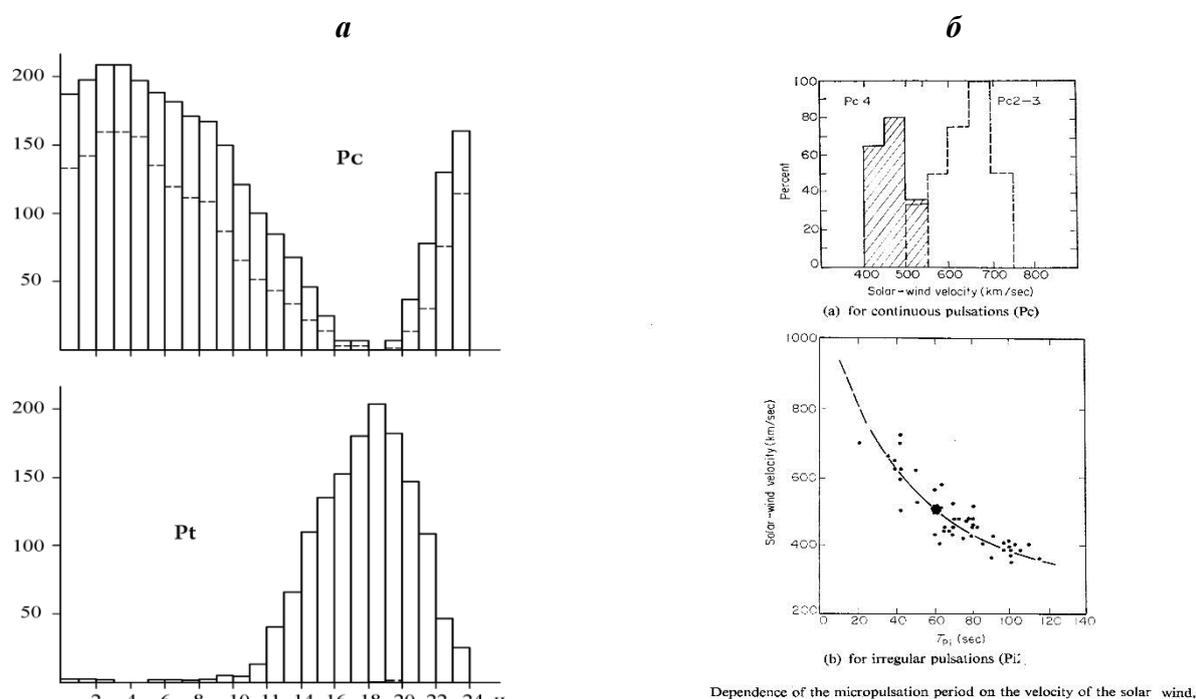
После окончания Второй Мировой Войны интерес к этим пульсациям как к наводкам в телеграфных сетях усилился. Поскольку чувствительность существующих в то время магнитометров не позволяла их увидеть, стали изучаться теллурические (земные) электрические токи. На основе их анализа аспирантка ИФЗ Валерия

Троицкая обнаружила, что быстрые вариации, которые она назвала короткопериодическими колебаниями – КПК [Троицкая, 1953] подчиняются четкой закономерности: днем наблюдаются квази-монохроматические регулярные колебания, а ночью – импульсные (рис. 1а). Термин КПК использовался более 50-ти лет, позднее эти колебания стали называть микропульсациями (как и работах [Harang, 1932; Sucksdorff, 1936]) или просто геомагнитными пульсациями. Однако в последние годы для этого диапазона волн стал использоваться и более формализованный термин - *ULF* (ultra-low frequencies), т.е. *УНЧ* (ультра-низкочастотные) волны, вероятно, по аналогии с *VLF* (very-low frequencies), т.е. *ОНЧ* волнами, представляющими собой волны свистовой моды.

Ниже будут рассмотрены главные фундаментальные результаты, впервые полученные В.А. Троицкой с её учениками, послужившие основой созданной ею российской школы по изучению геомагнитных пульсаций.

## 2. Фундаментальные характеристики геомагнитных пульсаций

Исследование геомагнитных пульсаций началось с установлением В.А. Троицкой двух колебательных режимов: непрерывного (*Pc*) и иррегулярного (*Pi*) [Троицкая, 1956]. Для изучения этих колебаний по её инициативе во время Международного Геофизического Года (1957-1959) в России было организовано 19 станций земных токов [Барсуков и Троицкая, 1959], две из которых (Борок и Ловозеро) затем превратились в базовые обсерватории, где были установлены основные фундаментальные закономерности разных типов геомагнитных пульсаций.



**Рисунок 1.** Суточный ход устойчивых (*Pc*) и иррегулярных (*Pi*) колебаний (а) и вероятности появления *Pc2-3* и *Pc4* (вверху) и периода *Pi2* (внизу) от скорости солнечного ветра.

Важным шагом в изучении геомагнитных пульсаций было создание их классификации, разработанной при активном участии В.А. Троицкой [Jacobs et al., 1964; Троицкая, 1964]. Этой классификацией и сейчас пользуются ученые всего мира. По данным наблюдений в обс. «Борок» были выявлены основные морфологические характеристики геомагнитных пульсаций и их связь с геомагнитной активностью и солнечным ветром. Например, было найдено, что при низкой скорости солнечного ветра возбуждаются *Pc4* пульсации [Троицкая, 1977; Большакова и др., 1995], а при высокой – более короткопериодным *Pc2-3* (рис. 1б). Эти и другие результаты подробно изложены в ряде монографий, например, [Гульельми и Троицкая, 1973; Пудовкин и др., 1976]. Так, было установлено, что период как устойчивых, так и иррегулярных колебаний с ростом геомагнитной возмущенности уменьшается (рис. 1б) [Troitskaya, 1964]. Это очень важный факт для развития теории генерации пульсаций, позволяющий связывать генерацию дневных КПК с резонансом силовых линий геомагнитного поля.

**2.1. Геомагнитные пульсации диапазона *Pc1*.** Интересные результаты были получены при анализе пульсаций в секундном диапазоне частот (*Pc1*,  $f=0.2-5.0$  Гц), поэтически названных «жемчужинами» (pearl pulsations), за их волновую форму, напоминающую нитку жемчужного ожерелья. Основные морфологические характеристики среднеширотных пульсаций *Pc1* были выявлены на основе анализа их регистрации в Борке с

использованием бумажного регистратора со скоростью протяжки 30 мм/мин, они были опубликованы в работах [Troitskaya, 1961, 1964; Матвеева и Троицкая, 1965]. Было установлено, что генерация  $Pc1$  пульсаций обычно наблюдается в восстановительную фазу магнитной бури, а циклический ход  $Pc1$ , в общем, находится в противофазе с циклом солнечной активности [Троицкая и др., 1978]. Все результаты, полученные В.А. Троицкой по данным наблюдений в обс «Борок», в дальнейшем были подтверждены многочисленными исследованиями колебаний  $Pc1$  в средних широтах.

**2.2. Геомагнитные пульсации  $Pc3$  и  $Pi2$ .** Наблюдения в обс. «Борок» показали, что этот вид пульсаций является самым распространенным видом дневных пульсаций, регистрируемым на земной поверхности [Троицкая 1953, 1956, 1977]. Было обнаружено, что их период уменьшается с уменьшением широты точки наблюдения, что привело к выводу, что эти колебания имеют резонансную природу.

Было установлено, что возбуждение  $Pi2$  пульсаций тесно связано с развитием магнитосферных суббурь, высыпанием электронов в авроральных широтах и полярными сияниями [Троицкая и др., 1966a; Troitskaya and Kleimenova, 1972]. На основе анализа наблюдений геомагнитных пульсаций в Борке впервые был построен волновой портрет магнитной бури [Троицкая и др., 1965] и показано, что в разные фазы магнитной бури происходит генерация разных типов геомагнитных пульсаций.

### 3. Геомагнитные наблюдения в сопряженных точках

Несмотря на большие трудности, В.А. Троицкой удалось впервые в мире организовать геомагнитные наблюдения на однотипной аппаратуре в сопряженных субавроральных областях: пос. Согра (Архангельская обл) и остров Кергелен (французская обсерватория в Индийском океане). Особый интерес эти наблюдения вызывали также тем, что выбранные точки находились вблизи проекции важной структурной области магнитосферы – плазмопаузы. Прежде всего было установлено, что в отличие от других видов пульсаций, волновые пакеты геомагнитных пульсаций типа  $Pc1$  («жемчужины») в северном и южном полушариях регистрируются не одновременно, а попеременно [Troitskaya et al., 1964b].

Анализ наблюдений в сопряженных точках показал, что поведение геомагнитных пульсаций  $Pc3$  и  $Pi2$  в магнитосопряженных точках сходно [Троицкая, 1968; Troitskaya and Raspopov, 1973]. Так, в противоположных полушариях эти пульсации появляются одновременно с одинаковым спектром, при этом колебания в  $X$ -компоненте синфазны, а в  $Y$ -компоненте противофазны. Впервые экспериментально было установлено, что большая часть геомагнитных пульсаций возбуждается в экваториальной плоскости магнитосферы и распространяется в ней вдоль силовых линий геомагнитного поля.

### 4. Диагностика состояния магнитосферы по наземным данным

Выполненный В.А. Троицкой и её учениками анализ наблюдений геомагнитных пульсаций в Борке позволил прийти к заключению, что зарегистрированные на земной поверхности колебания несут важную информацию о плазменных процессах в различных областях магнитосферы и околоземного космического пространства. Было установлено, что характеристики пульсаций определяются магнитосферными процессами и динамикой крупномасштабных доменов магнитосферной плазмы.

Основываясь на этих результатах, В.А. Троицкой и её учениками было создано новое направление в геофизике – наземная диагностика состояния магнитосферы [Троицкая и др., 1966b; Troitskaya, 1967; Troitskaya and Gul'elmi 1967, 1970; Троицкая, 1969; Гульельми и Троицкая, 1973]. Важность разработанного метода состоит в том, что он позволяет проводить непрерывный мониторинг оценки состояния околоземного пространства и положения основных магнитосферных доменов. Следует отметить, что спутниковые и наземные методы исследования околоземного пространства не являются конкурирующими, а взаимно дополняют друг друга.

### 5. Геомагнитные пульсации в полярных широтах

Исследование процессов в полярных областях Земли является одной из наиболее актуальных проблем в физике магнитосферы, поскольку именно там формируются условия космической погоды в околоземном пространстве. Первые наблюдения геомагнитных пульсаций в Антарктиде в обс. Мирный, Молодежная и Новолазаревская были начаты во время МГТ по инициативе В.А. Троицкой. Анализ этих наблюдений показал [Троицкая, 1961; Троицкая и др., 1966a], что и в полярных широтах регистрируются как устойчивые, так и иррегулярные геомагнитные пульсации.

В полярной шапке В.А. Троицкой были обнаружены новые, не известные ранее типы высокоширотных пульсаций и установлены их характеристики [Troitskaya et al., 1980]. Кроме того, в окрестности проекции дневного полярного каспа был обнаружен новый тип высокоширотных длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне периодов 3-10 мин и с амплитудой порядка 15–60 нТл [Troitskaya and Bolshakova, 1977]. Эти колебания были названы *ipcl* (*irregular pulsations cusp latitudes*). Различные физические процессы, протекающие в области дневного полярного каспа, а также разные типы волновых явлений в этой области рассмотрены в монографии [Троицкая и др., 1987].

Таким образом, под руководством В.А. Троицкой были выполнены пионерские исследования геомагнитных пульсаций и впервые выявлены главные закономерности колебательных режимов в магнитном поле Земли. Это стало фундаментом для создания отечественной школы по исследованию волновых явлений в геомагнитном поле, играющих ключевую роль в динамике магнитосферной плазмы.

В настоящее время изучение геомагнитных пульсаций является одним из важных направлений физики магнитосферы и солнечно-земных связей.

Ниже приведены основные публикации В.А. Троицкой о геомагнитных пульсациях.

## **Литература**

- Барсуков О.М., Троицкая В.А.* Советские станции земных токов. М.: Изд. АН СССР, 36 с. 1959.
- Большакова О.В., Боровкова О.К., Троицкая В.А., Клейменова Н.Г.* Интенсификация геомагнитных пульсаций Pc4 в условиях спокойной магнитосферы, Геомагнетизм и аэрномия, Т.35, N 3, С.143-145. 1995.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 208с. 1973.
- Матвеева Э.Т., Троицкая В.А.* Общие закономерности колебательного режима типа «жемчужин» // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 5. № 6. С. 1078–1084. 1965.
- Пудовкин М.И., Распов О.М., Клейменова Н.Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть 2. Короткопериодные колебания геомагнитного поля. Л.: ЛГУ, 1976. 271 с. 1965.
- Троицкая В.А.* Два колебательных режима электромагнитного поля Земли и их суточный ход по мировому времени // Докл. АН СССР. Т. 93. №6. С. 261-264. 1953.
- Троицкая В.А.* Короткопериодные возмущения электромагнитного поля Земли, Вопросы изучения переменных электромагнитных полей. М.: Наука, С. 27-61. 1956.
- Троицкая В.А.* Устойчивые колебания и колебания типа цугов в Арктике и Антарктике. // Короткопериодические колебания электромагнитного поля Земли. М.: Наука, №3. С. 41-61. 1961.
- Троицкая В.А.* Классификация быстрых вариаций магнитного поля и земных токов // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 4. С. 615-619. 1964.
- Троицкая В.А., Мельникова М.В., Большакова О.В., Рокитянская Д.А., Булатова Г.А.* Тонкая структура магнитных бурь // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. № 6. С. 82-86. 1965.
- Троицкая В.А., Щепетнов Р.В., Большакова О.В., Матвеева Э.Т.* Характерные особенности быстрых вариаций электромагнитного поля Земли в полярных районах // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. № 1. С. 76-79. 1966а.
- Троицкая В.А., Большакова О.В., Матвеева Э.Т.* Быстрые вариации электромагнитного поля как индикатор состояния радиационных поясов и геомагнетосферы // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 6. №. 3. С. 393-398. 1966б.
- Троицкая В.А.* Исследования в магнитосопряженных точках // Вестник АН СССР. №1. С. 68-74. 1968.
- Троицкая В.А.* Микропульсации магнитного поля Земли и диагностика магнитосферы // Вестник АН СССР. №6. С. 67-74. 1969.
- Троицкая В.А.* Геомагнитные пульсации // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. №1. С. 70-72. 1977.
- Троицкая В.А., Большакова О.В., Калишер А.Л., Матвеева Э.Т.* Геомагнитные пульсации в цикле солнечной активности // Геомагнитные исследования. № 23. С. 97-104. 1978.
- Троицкая В.А., Пудовкин М.И., Клейменова Н.Г., Шалимов С.Л.* Физические процессы в дневных полярных каспах. М.: МГК АН СССР, 127 с. 1987.
- Harang L.* Observations of micropulsations in the magnetic records at Tromso // Terrest. Magn. V. 37. P. 57–61. 1932.
- Jacobs J.A., Kato Y., Matsushita S, Troitskaya V.A.* Classification of geomagnetic micropulsations // J. Geophys. Res. V.69. P. 180-181. 1964.
- Sucksdorff E.* Occurrences of rapid micropulsations at Sodankyla during 1932 to 1935 // Terrest. Magn. V. 41. P. 337-344. 1936.
- Troitskaya V.A.* Rapid variations of the electromagnetic field of the Earth // Res. Geophys. V. 1. No. 19. P. 485-532. 1964a.
- Troitskaya V.A., Gendrin R., Stefant R.* Observations en points conjugués de haute latitude des émissions hydromagnétiques structures // C. R. Acad. Sci. V. 259. № 5. P. 1175-1178. 1964b.
- Troitskaya V.A.* Micropulsations and the state of the magnetosphere // Solar. Terr. Phys. V. 7. P. 213-274. 1967.
- Troitskaya V.A., Gul`elmi A.V.* Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // Space Sci. Rev. V. 7. No. 5-6. P. 689-768. 1967.
- Troitskaya V.A., Gul`elmi A.V.* Hydromagnetic diagnostics of the plasma in the magnetosphere // Ann. Geophys. V. 26. No. 4. P. 893-902. 1970.
- Troitskaya V.A., Kleimenova N.G.* Micropulsations and VLF-emissions during substorms // Planet. Space Sci. V. 20. No. 9. P. 1499-1519. 1972.
- Troitskaya V.A., Raspopov O.M.* Geomagnetic pulsations at conjugate points // IAGA Bulletin. № 34. P. 36. 1973.
- Troitskaya V.A., Bolshakova O.V.* Diurnal latitude variation of the location of the dayside cusp // Planet. Space Sci. V. 25. P. 1167-1169. 1977.
- Troitskaya V.A., Bolshakova O.V., Matveeva E.T.* Geomagnetic pulsations in the polar cap // J. Geomag. Geoelectr. V. 32. P. 309-324. 1980.
- Troitskaya V.A.* ULF wave investigations in the dayside cusp // Adv. Space Res. V. 5. № 4. P. 219-228. 1985.