

В полученном выражении первое слагаемое является равным критическому значению числа Релея в невращающейся модели. Далее идет член, квадратичный по τ , причем расчеты показали, что выражение в скобках положительное. Наличие двух точек покоя также связано с определенной симметрией системы (3) относительно смены знаков амплитуд. Численный счет показал, что найденные точки покоя неустойчивы при $\tau > 10$, но дивергенция фазовых скоростей, как и в случае отсутствия вращения, отрицательная. Поэтому фазовое пространство также должно обладать предельным многообразием типа предельного цикла или аттрактора.

Численные расчеты показали, что при различных m и для значения $\tau = 6.4 \cdot 10^{14}$, которое согласуется с τ в земном ядре, значения Ra_{cr}^2 составляют:

$$Ra_{cr1}^2 = 6.8 \cdot 10^{28} \text{ для } m = 1;$$

$$Ra_{cr2}^2 = 7.4 \cdot 10^{28} \text{ для } m = 2;$$

$$Ra_{cr3}^2 = 8.4 \cdot 10^{28} \text{ для } m = 3.$$

Оценка числа Релея для ядра при принятых в задачах геодинamo значениях параметров [3] $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $k = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\delta T = 10^3 \text{ К}$, $\beta = 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ дает $Ra \sim 10^{29}$, что соответствует малым надкритичностям, рассмотренным в данной работе.

Выводы.

В работе проведено обобщение задачи Лоренца маломодовой конвекции на сферическую оболочку. Показано, что при относительной толщине оболочки характерной для жидкого ядра Земли при условии малых надкритичностей первыми возбуждаются конвективные моды, соответствующие сферическому индексу $n = 4$. Установлено, что в рамках рассматриваемой модели различие условий генерации мод по индексу m без учета вращения не возникает. Подобно задаче Лоренца при превышении числом Релея критического значения возникает два режима стационарной конвекции.

При рассмотрении вращающейся оболочки показано, что критическое число Релея всегда превосходит невращающийся случай, причем оно растет пропорционально квадрату угловой скорости. Расчеты этих критических значений при степени $n = 4$ и порядках $m = 1, 2, 3$ при параметрах слоя, подобным параметрам жидкого ядра, показали, что эти значения являются величинами одного порядка. Тот же порядок дают оценки реального числа Релея, что свидетельствует о малой надкритичности земной конвекции и о том, что крупномасштабная конвекция может описываться одной из полоидальных мод типа ${}_0v_{4m}^P$.

Работа выполнена при поддержке ДВО РАН (проект 10-III-B-07-158).

Литература

1. Водинчар Г.М., Шевцов Б.М. Маломодовая модель конвекции во вращающемся шаровом слое вязкой жидкости // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 4. С. 3-15.
2. Ладыженская О.А. Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1970. 232 с.
3. Kono M., Roberts P.H. Recent geodynamo simulations and observations of the field // Reviews of Geophysics. 2002. V. 40. № 10. P. B1-B41.

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ РАДИОПОМЕХИ, КАК СРЕДСТВО ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ LOW-FREQUENCY RADIO NOISE AS A MEANS OF ENVIRONMENT DIAGNOSTICS

Ларкина В.И.

ИЗМИРАН, larkina@izmiran.ru

The complex analysis of the results of satellite measurements of low-frequency electromagnetic emission intensity in the sound range of frequencies of 100 Hz-20 kHz (which are considered to be radio noise), streams of energy electrons, density and temperatures of ionospheric plasma showed the reaction of ionosphere plasmas on the processes of geomagnetic disturbances, preparations of active seismic and slow geodynamic processes. Change of ionosphere plasma parameters, especially, of the intensity of low-frequency noise, over the regions of radioactive pollution was established. The scheme of global satellite monitoring for remote sounding of ecological conditions to reveal the indignations of natural and technogenic character is offered.

Естественные низкочастотные шумовые излучения принято считать радиопомехами. На самом деле они являются эффективным средством диагностики и изучения динамических процессов в окружающем Землю пространстве. Они отражают процессы перестройки магнитосферной и ионосферной плазмы и несут информацию об изменениях параметров окружающей среды в ходе развития процессов геомагнитной, сейсмической и другой активности.

Нами получены пространственно-временные характеристики низкочастотных шумов (в абсолютных единицах) в различных областях пространства в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. Построена полная картина развития геомагнитной бури в низкочастотных шумовых излучениях и потоках электронов $E_e \geq 40$ кэВ. Обнаружено резкое увеличение амплитуды низкочастотных электромагнитных шумов во внешней ионосфере над эпицентрами сильных землетрясений. Исследована комплексная картина изменения геофизических параметров над областями подготовки землетрясений. Отклик ионосферной плазмы зарегистрирован и над зоной эпицентра и в магнитосопряженном полушарии.

По результатам комплексного анализа спутниковых измерений параметров ионосферной плазмы было обнаружено изменение параметров, особенно над регионами радиоактивных загрязнений. Об этом свидетельствует сравнение спутниковых данных об изменениях параметров ионосферной плазмы с наземными данными регистрации содержания цезия, йода и других радионуклидов в донных осадках Карского и Баренцева морей.

Предлагается схема глобального спутникового мониторинга для дистанционного зондирования окружающей среды (экологической обстановки) с целью выявления возмущений природного и техногенного характера.

Цель работы - показать, что низкочастотные шумы демонстрируют изменения параметров ионосферной плазмы и могут быть средством диагностики окружающей среды.

1. Геомагнитная буря и низкочастотные шумы

Интенсивность и спектр низкочастотных шумовых излучений (0,1-20 кГц), регистрируемых на высотах внешней ионосферы (500-1000 км), зависят от свойств плазмосферы (плотности и температуры окружающей плазмы), в которой они возбуждаются и распространяются. Во время геомагнитных возмущений происходят изменения параметров ионосферной плазмы: изменяется плотность среды, варьируются спектр и потоки энергичных частиц, меняется геомагнитное поле.

Во время геомагнитных бурь радиационные пояса пополняются новыми "свежими" частицами, происходят пространственное перемещение радиационных поясов, высыпание электронов, и, как следствие, возбуждение низкочастотных шумовых излучений и перемещение в пространстве области генерации низкочастотных шумов.

Рис. 1 демонстрирует одновременные вариации низкочастотных шумовых излучений и плотности потока энергичных электронов во время большой геомагнитной бури в декабре 1971 г. Информация приведена для трех витков спутника, проходивших в одной и той же области пространства. В спокойное время в распределении плотности потока квазизахваченных электронов четко прослеживаются структуры внутреннего и внешнего радиационных поясов (рис. 1б). Максимум интенсивности шумов регистрировался, как всегда, на $L=4 \div 5$, т.е. в области под сводом плазмопаузы, где они, скорее всего и возбуждаются. Максимум интенсивности шумов наблюдался в области зазора между радиационными поясами и примыкающей к нему областью внутренней границы внешнего радиационного пояса.

Во время главной фазы бури возросла плотность потока квазизахваченных частиц, внутренняя граница внешнего радиационного пояса переместилась ближе к Земле. Во время бури значительно возросла интенсивность шумов, максимум и интенсивность зарегистрированы ближе к Земле, на $L=3 \div 4.5$. Он наблюдался в области зазора между радиационными поясами и внутренней кромкой внешнего радиационного пояса. В это же время были зарегистрированы интенсивные потоки высыпавшихся электронов, они были зарегистрированы в области зазора между радиационными поясами и примыкающей к зазору внутренней границей внешнего радиационного пояса, то есть в той же области, где регистрировались наиболее интенсивные шумовые излучения. Во время возмущений было зарегистрировано появление одновременных мелко-масштабных флуктуаций интенсивности низкочастотных шумов и плотности потока энергичных электронов в области максимальной интенсивности шумов.

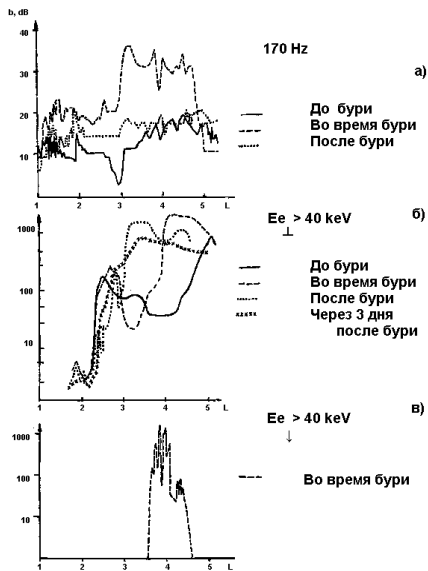


Рис.1 Одновременные вариации низкочастотных шумовых излучений (170 Гц) и плотности потока квазизахваченных и высыпающихся электронов с энергиями $E_e \geq 40$ кэВ во время большой геомагнитной бури в декабре 1971 г. Приведены вариации интенсивности магнитной компоненты (вариации электрической составляющей аналогичны). До бури информация приведена сплошными линиями, во время возмущения штриховыми линиями, после бури-пунктиром.

Из рисунка (см. рис. 1) ясно видно, что в ходе развития магнитной бури происходит перемещение ближе к Земле радиационных поясов максимума интенсивности шумов. Такие вариации потоков энергичных частиц во время бури называются диффузионной волной. Область возбуждения низкочастотных шумов в экваториальной области магнитосферы испытывает аналогичное пространственное перемещение, следуя за так называемой диффузионной волной. На основании сопоставления перемещения максимумов интенсивности низкочастотных излучений и плотности потоков энергичных электронов различных энергий была определена скорость диффузионной волны разных энергетических компонент в разные фазы бури (~ 6500 км/ час).

Когда заканчивается приток новых частиц, кольцевой ток постепенно уменьшается в течение от одного до нескольких дней. Экспериментальные данные и результаты расчетов позволили сделать вывод [1], что основным механизмом потерь электронов из радиационных поясов является питч-угловая диффузия этих частиц, вызванная высокочастотной турбулентностью, то есть генерацией низкочастотных излучений. В процессе питч-угловой диффузии энергичные электроны попадают в зону конуса потерь и высыпаются в ионосферу, вызывая дополнительную ионизацию. Теоретические исследования показали, что интенсивность низкочастотных излучений определяет предельно допустимые потоки захваченных энергичных частиц во внешнем радиационном поясе $L > 3$, определяя время жизни захваченных и высыпающихся электронов [2]. За это время магнитное поле постепенно возвращается к своему обычному состоянию и восстановительная фаза бури заканчивается. Во время восстановительной фазы бури происходит высыпание частиц из радиационных поясов и возбуждение низкочастотных шумов этими частицами. Отражение этих процессов мы видели в особенностях вариаций интенсивности низкочастотных шумов во внешней ионосфере. Однако, не всегда к концу восстановительной фазы уровень излучения снижается до уровня, присущего спокойному периоду – достаточно интенсивное излучение сохраняется еще некоторое время.

После окончания бури потоки квазизахваченных электронов на $3 < L < 4,5$ все еще достаточно велики. Пространственная структура потоков частиц даже через 3 дня после окончания бури достаточно сложная, особенно, в области внутреннего радиационного пояса, на $L < 3$ заметен ряд максимумов и минимумов. Можно заметить, что в области $L \sim 4$ наблюдается формирование "нового" зазора между радиационными поясами. После окончания геомагнитной бури излучение все еще достаточно интенсивно, и максимум его находится на $L \sim 2,5 \div 3,5$.

В ходе развития магнитной бури произошли существенные изменения в спектре низкочастотных излучений. В спокойное время излучения были наиболее интенсивны на частотах 100-800 Гц, во время бури спектр шумов расширился до $2,5 \div 4$ кГц. До бури на частотах 2500 Гц излучение не было отмечено. Во время магнитной бури излучение на частоте 2500 Гц было

максимально в области зазора между радиационными поясами и примыкающей к нему внутренней кромкой внешнего радиационного пояса, то есть максимум был отмечен там же, где он был зарегистрирован и на частотах 170 и 500 Гц.

Оценены пространственно-временные изменения амплитуды шумов: во время возмущений происходит перемещение максимума излучений ближе к Земле, во время восстановительной фазы бури происходит обратное перемещение, максимум шумов отдаляется от Земли. Минимум, до которого смещается максимум излучений, и скорость этих перемещений зависят от мощности бури.

Таблица 1

Средние характеристики изменения амплитуды шумовых излучений в ходе развития магнитных бурь

Характеристика бури	Максимальная интенсивность, $\gamma/\sqrt{\text{Гц}}$	Lmax	T дней
Малая магнитная буря	$<10^{-4}$	3.5	–
Средняя магнитная буря	$\sim 10^{-4}$	2.5	1.5 – 2
Большая магнитная буря	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$	2 – 2.5	до 4-х

Каждая магнитная буря имеет свои характерные особенности и отмечается в некоторых отношениях от всех прочих бурь. Все же некоторые общие характерные особенности проявляются во многих (возможно, в большинстве) геомагнитных бурь. Несмотря на особенности пространственно-временных изменений интенсивности излучений, присущих каждой отдельной буре, установлено, что интенсивность шумовых излучений растет с увеличением Dst вариаций.

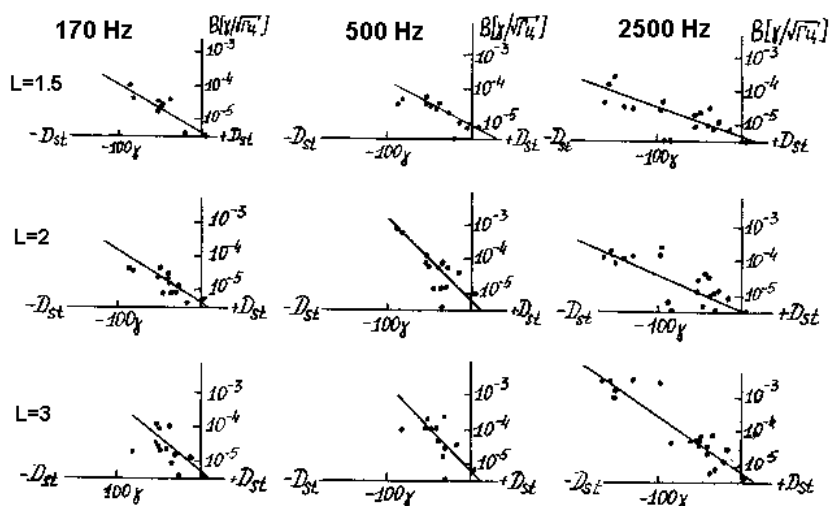


Рис. 2. Вариации интенсивности низкочастотных излучений в зависимости от величины Dst – вариаций.

На рис. 2 представлены вариации интенсивности низкочастотных излучений на нескольких частотах для различных L-оболочек в зависимости от величины Dst. Из рисунка ясно видно, что скорость роста излучений растет с увеличением величины L-оболочки. Скорость роста амплитуды излучений с Dst несколько различается на разных частотах. Увеличение амплитуды шумовых излучений с ростом Dst отражает увеличение количества частиц в радиационных поясах, приводящее к возрастанию энергии кольцевого тока.

Волновые эксперименты на ИСЗ "Интеркосмос 3" и "Интеркосмос 5" летали при средней солнечной активности, и спутники "Интеркосмос 18", "Интеркосмос 19", "Aureol 3" и "Космос 1809" – при максимальной активности.

Аппаратура всех перечисленных волновых экспериментов была однотипной, во всех экспериментах сохранялись основные параметры. Длительное время существования спутников и большой объем полезной информации дали возможность сравнивать вариации интенсивности низкочастотных излучений в различных условиях геомагнитной и солнечной активности. На рис. 3 показаны вариации интенсивности низкочастотных шумовых излучений в зависимости от величины Dst вариаций для различных L – оболочек и для различных условий солнечной активности. Установлено, что интенсивность излучений растет с ростом солнечной активности.

Исследования были выполнены для 27 малых, 19 средних и 9 больших магнитных бурь.

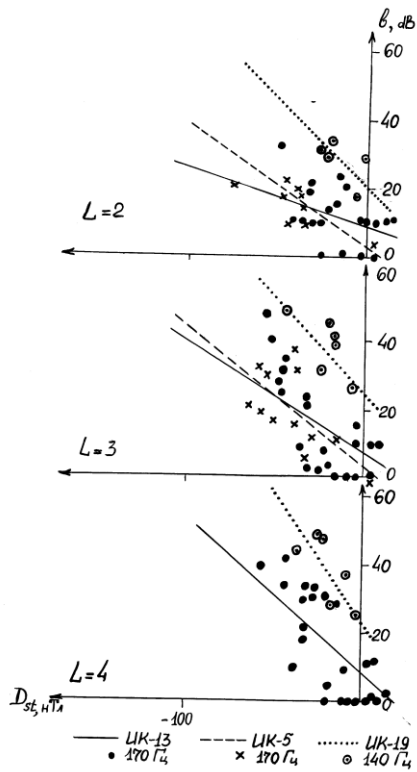


Рис. 3 Низкочастотные излучения и солнечная активность.

2. Низкочастотные шумовые излучения и процессы в литосфере

По данным спутника "Интеркосмос 19" был обнаружен эффект резкого возрастания интенсивности низкочастотных электромагнитных излучений в верхней ионосфере при пролете спутника над зоной готовящегося или происходящего землетрясения с магнитудой 5 баллов и выше [3, 4]. Обнаруженное явление вызвало большой интерес у геофизиков. Совокупность результатов этих исследований позволяет считать, что ионосфера, в целом, и протекающие в ней процессы являются индикатором определенных процессов в литосфере, хотя механизм наблюдаемых явлений нельзя считать установленным [5, 6].

В последние годы появилось много публикаций, с разной степенью точности, свидетельствующие о связи явлений регистрируемых на высотах внешней ионосферы с процессами в литосфере.

Над эпицентрами сильных землетрясений по спутниковым данным были зарегистрированы всплески магнитной и электрической компонент поля низкочастотных шумовых излучений за несколько часов до главного сейсмического удара. Излучение носит импульсный характер и оно наиболее интенсивно на частотах ниже 1 кГц. До землетрясения излучение имеет электромагнитный характер, регистрируются и магнитная и электрическая составляющие, после землетрясения, излучение носит электростатический характер, регистрируются только электрическая компонента поля излучений. Определены пространственно-временные размеры зоны регистрации аномальных всплесков низкочастотных излучений над зонами подготовки землетрясений [3-6]. По амплитуде всплески всегда превышали уровень шумов, обычно наблюдаемый в данной области пространства [7]. Рис. 3 подтверждает этот тезис. На рисунке приведены результаты статистической обработки спутниковой информации об изменениях интенсивности шумов в разных условиях геомагнитной активности (для спокойных условий индекс $K_p \leq 2$, для умеренно-возмущенных $3 \leq K_p \leq 4$ – и для больших магнитных бурь $K_p \geq 5$ –). На рисунке также указан среднестатистический разброс интенсивности шумов. Различными значками обозначены значения регистрируемых всплесков шумов для конкретных случаев землетрясений. Из рисунка ясно видно, что всплески шумов, связанные с развитием сейсмической активности, всегда превышают уровень среднестатистических шумов.

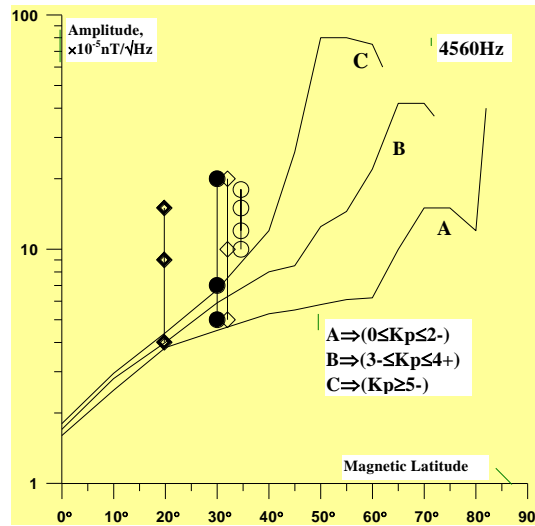


Рис. 3. Результаты статистической обработки спутниковой информации об изменениях интенсивности шумов в разных условиях геомагнитной активности

Построена картина временного развития электромагнитных и электрических явлений, сопровождающих проявление сейсмической активности. Определены пространственно-временные размеры зоны резкого изменения параметров ионосферной плазмы над областями подготовки главного сейсмического удара (моменты землетрясения). Результаты статистических исследований сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Зоны наблюдения сейсмо-ионосферных аномалий на высотах верхней ионосферы

Параметр	Диапазон	Размер зон	Время (до)
Волны	КНЧ/ОНЧ	$\Delta\phi = \pm 3^\circ$, $\Delta\lambda = \pm 60^\circ$	Несколько часов
Электроны	$E_e \geq 40 \text{ кэВ}$, $E_e \geq 100 \text{ кэВ}$	0.1 L	2,5-3 часа
Плотность плазмы		$\pm 3^\circ$	Сутки

Таким образом, установлено, что процессы подготовки землетрясений сопровождаются изменениями параметров ионосферной плазмы:

- интенсивности низкочастотных излучений,
- плотности потока квазизахваченных и высыпающихся электронов,
- изменениями плотности и температуры ионосферной плазмы.

3. Низкочастотные шумовые излучения и радиоактивные загрязнения

По данным северной экспедиции были обнаружены зоны повышенного содержания цезия ^{137}Cs и радионуклидов в донных осадках Карского моря. [8]. В районе Карского и Баренцева морей на спутнике "Интеркосмос 19" мы наблюдали одновременные всплески низкочастотных шумов, плотности потока низкоэнергичных электронов ($E_e \sim 50 \text{ эВ}$ и $E_e \sim 120 \text{ эВ}$) и температуры плазмы, сопровождаемые интенсивными флуктуациями волн и частиц. Коэффициент корреляции огибающей всплесков шумов и потоков электронов низкой энергии составил 0.7-0.8. Области регистрации одновременных флуктуаций параметров ионосферной плазмы и области повышенной концентрации радиоактивности элементов совпали [9]. Результаты получены для серии пролетов спутника в марте и в июне 1979 г., они аналогичны. То есть радиоактивные загрязнения могут быть обнаружены по спутниковой экспертизе низкочастотных шумов и других параметров ионосферной плазмы, которые в свою очередь отражают структуру земной коры.

На японском спутнике ISS-b, летавшем одновременно со спутником "Интеркосмос 19" регистрировались ионы водорода, гелия и кислорода. По опубликованным результатам мы построили карты распределения легких ионов над интересующим нас регионом. Анализируя полученные ранее сведения и данные о флуктуациях параметров по данным спутника "Интеркосмос 19", мы установили, что наиболее интенсивные потоки легких ионов, особенно, водорода и гелия, наблюдались над зонами регистрации интенсивных флуктуаций и зонами повышенного содержания радионуклидов (например, ^{137}Cs) в Карском и Баренцевом морях [9].

Таким образом, установлено, что

- обнаруженные по спутниковым данным зоны регистрации одновременных всплесков интенсивности низкочастотных излучений, плотности потока низкоэнергичных электронов и температуры ионосферной плазмы четко совпали с зонами радиоактивного загрязнения, а также с зонами регистрации интенсивных потоков ионов гелия и водорода.
- зоны радиоактивного загрязнения, найденные двумя методами (отобранных проб морской воды и донных осадков и спутниковых измерений параметров ионосферной плазмы) пространственно хорошо совпали друг с другом.
- радиоактивные загрязнения могут быть обнаружены с помощью спутниковых измерений параметров ионосферной плазмы над различными районами земной поверхности.

4. Диагностика окружающей среды по данным спутникового мониторинга параметров ионосферной плазмы

Анализируя результаты комплексных спутниковых измерений параметров ионосферной плазмы мы показали, что изменения параметров свидетельствуют об отклике ионосферной плазмы на изменения параметров окружающей среды и могут быть привлечены как средство диагностики окружающего нас мира.

Мы предлагаем схемы дистанционного мониторинга околоземной космической плазмы с целью выявления возмущений природного техногенного характера:

- способ прогнозирования землетрясений [10]
- способ обнаружения литосферных зон переменной геодинамической активности [11]
- способ обнаружения радиоактивных загрязнений в приземном слое атмосферы, в водном и придонном слоях гидросферы [12].

Все это позволит организовать высокоинформативный мониторинг состояния околоземной ионосферной плазмы, как над отдельными регионами, так и в планетарном масштабе.

Литература:

1. Kennel C.F., Petchek H.E. Limit of stable trapped particle fluxes // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, N1. P. 1.
2. Thorne E.M., Smith E.J. et al. Plasmaspheric hiss // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N10. P. 1583-1594.
3. Мигулин В.В., Ларкина В.И., Молчанов О.А. и др. Обнаружение эффектов воздействия землетрясения на ОНЧ-КНЧ шумы во внешней ионосфере // Препринт N25 (390), М.: ИЗМИРАН. 1982. 23 с.
4. Ларкина В.И., Наливайко А.В., Гершензон и др. Наблюдения на спутнике "Интеркосмос 19" ОНЧ излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэронавигация. 1983. Т.23, N5. с. 842-846.
5. Ларкина В.И., Мигулин В.В., Молчанов О.А. Некоторые статистические особенности возбуждения низкочастотных излучений в верхней ионосфере над районами землетрясений // Геомагнетизм и аэронавигация. 1988. Т. 28, N5, с. 812-817.
6. Larkina V.I., Migulin V.V., Molchanov O.A. et al. Some statistical results on very low-frequency radio-wave emissions in the upper ionosphere over earthquake zones // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. V. 57. P. 100-109.
7. Larkina V.I., Ruzhin Yu.Ya., Mineev Yu.V. et al. Investigation of the plasma disturbances at the satellite orbit over earthquake epicenter // Geomagnetic Field and Ionosphere variations. Proceeding of the 2nd INDO-RUSSIAN Symposium of Nature and Variations of the Geomagnetic Field. Moscow. 1998. P. 260-269.
8. Матишов Г., Матишов Д., Щипа Е., Риссанен К. Радионуклиды в экосистемах региона Баренцева и Карского морей. *КНЦ РАН, Аналиты*, 237 с., 1999.
9. Larkina V.I., Ruzhin Yu.Ya. et al. Remote identification of radioactive contamination by satellite measurements // Advances in Space Research. 2004. V. 33, P. 348-352.
10. А.С. N1171737. Мигулин В.В., Ларкина В.И., Молчанов О.А., Наливайко А.В. "Способ прогнозирования землетрясений". Бюл. N29. 1985. с приоритетом 26 декабря 1983 г.
11. Патент N2158942 на изобретение "обнаружения литосферных зон переменной геодинамической активности". Приоритет 29.10.1999 г., зарегистрирован 10 ноября 2000 г. Авторы: Ларкина В.И., Ружин Ю.Я., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В.
12. Патент N22007597 на изобретение "Способ обнаружения радиоактивных загрязнений в приземном слое атмосферы, в водном и придонном слоях гидросферы. Приоритет 04.07.2001, зарегистрирован 27 июня 2003 г. Авторы: Ларкина В.И., Ларкин В.Г., Ружин Ю.Я., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В.