

ПЕРСПЕКТИВЫ НАЗЕМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

**Власенко В. П.¹, Залюбовский И. И.², Карташев В.М.², Кирпикина О.Ф.²,
Ковтун В. Е.², Маслов В. И.¹, Минко О. К.², Сорокин А. Ф.¹, Цюх А. М.¹,
Черемных О. К.³, Шматко Е. С.²**

¹*Центр приема научной информации Национального центра управления
и испытаний космических средств, Евпатория, Украина*

²*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина*

³*Институт космических исследований НАНУ-НКАУ, Киев*

Описаны гипотетическая физическая модель одного из солнечно-земных процессов, предложенная на основании предшествующих результатов авторов, метод экспериментальной проверки ее соответствия реальным физическим механизмам и перечислены ожидаемые результаты.

1. Введение

Преимущества прямых исследований околоземного космического пространства, гелиосферы и космических лучей с помощью космических аппаратов не вызывает сомнений. Между тем, не все физические задачи ближнего и дальнего космоса удобно решать с их помощью. В частности, быстрое изменение во времени пространственных координат искусственного спутника Земли затрудняет получение информации при решении задач околоземного космического пространства и солнечно-земных связей, требующих длительного наблюдения за одной из магнитных оболочек или даже за одной магнитной силовой линией Земли. Ниже описывается вариант наземных исследований, который вкупе с аппаратными методами получения космических данных поможет проследить многоступенчатый процесс развития крупномасштабного солнечно-земного явления.

2. Гипотеза развития солнечно-земного процесса

Процесс берет начало на Солнце во время мощных вспышек или в момент прохождения через центральный солнечный меридиан экваториальных корональных дыр. Названные солнечные источники образуют вспышечные [1] или рекуррентные [2] высокоскоростные потоки в замагниченной плазме солнечного ветра, которые в пространстве между Солнцем и Землей могут сформировать вспышечные или коротирующие магнитогидродинамические (МГД) ударные волны (см. рис. 1 и 2).

На фронтах ударных МГД-волн происходит ускорение ионов [3]. Потоки ускоренных ионов дрейфуют преимущественно вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля в непосредственной близости от фронта ударной волны, многократно его пересекая, и при переходе через головную бесстолкновительную стоячую МГД-волну перед магнитосферой Земли возбуждают альвеновские и ионно-циклотронные волны.

Последние, дойдя до головной части магнитосферы, частично трансформируются в альвеновские и магнитоакустические МГД волны. Альвеновские волны распространяются вдоль внешних силовых линий магнитосферы и в ее внутренние зоны не попадают. Магнитоакустические внутренние волны, двигаясь по холодной магнитосферной плазме поперек силовых линий, достигают радиационного пояса и запускают в нем самостоятельный процесс раскачки циклотронных неустойчивостей захваченных электронов и протонов. Развитие электронной неустойчивости заканчивается быстрой диффузией их в питч-угловой конус потерь и высыпанием в атмосферу Земли (рис.3). Дрейфовый кольцевой магнитосферный ток протонов, имеющий место во время протекания магнитной бури, порождает новые МГД-волны, которые будут поддерживать режим высыпаний, когда основные процессы на головной части магнитосферы завершатся. Потоки высыпающихся электронов имеют форму сгустков. Их длительность равна времени прохождения электроном области захвата между северной и южной магнитными пробками (~0.1 с). Есть предположение, что кратковременные потоки электронов (всплески) имеют тонкую структуру, разбиваясь на более короткие сгустки (банчи) с частотой следования, которая совпадет с частотой электронно-циклотронного резонанса (5-40 кГц для электронов с энергией 0.7-3 МэВ). В магнитном поле Земли всплески потоков электронов генерируют всплески высокочастотного (ВЧ) синхротронного радиоизлучения [4]. Область генерации лежит на высотах 50-100 км. Ниже этих высот электроны поглощаются в атмосфере. Плотность потока ВЧ-радиоизлучения с больших высот падает как из-за удаления источника, так и вследствие уменьшения величины магнитного поля, что влечет за собой уменьшение верхней граничной частоты синхротронного радиоизлучения и уход ее из полосы регистрации.

Всплески ВЧ-радиоизлучения предположительно имеют частично когерентный характер, то есть отдельные банчи излучают когерентно, а суммарное излучение банчей, составляющих всплеск, некогерентно. Область генерации всплесков радиоизлучения на высотах порядка 100 км по оценкам [4] имеет площадь горизонтального сечения около 20 км². Регистрируются как одиночные ВЧ-радиовсплески, так и их группы и продолжительные серии. Все они имеют сходную природу, которая различается только масштабом упомянутых выше высокоскоростных потоков в солнечном ветре. Причем одиночные высыпания электронов, вероятно, вызываются локальными неоднородностями в солнечном ветре типа тангенциальных разрывов [5]. На рис. 4 показано усредненное по 413 одиночным радиовсплескам спектральное распределение, измеренное в эксперименте [4]. Оно соответствует дифференциальному энергетическому спектру высыпающихся электронов $\propto E^{-4.5} dE$, который совпадает с их спектром в зоне захвата. Уположение радиочастотного спектра на его нижней границе обусловлено методом отбора событий экспериментальной установкой, в которой применялось тройное совпадение во времени импульсов на частотах 38, 74 и 120 МГц. А это приводило к ограничению вклада в регистрируемое синхротронное радиоизлучение электронов с энергией менее 1 МэВ. Тот факт, что высыпающиеся потоки электронов охватывают локальные

пучки силовых линий, носит принципиальный характер. Дело в том, что высыпание электронов и протонов (последние также высыпаются и поглощаются в атмосфере, но практически не излучают) приводит к опустошению зоны, где они были захвачены. Но поскольку опустошенная зона локальна, она быстро заполняется за счет центробежного и градиентного дрейфов электронов и протонов в пределах данной магнитной оболочки, а также пополняется радиальной диффузией со стороны более высоких магнитных оболочек во время протекания нестационарных процессов в магнитосфере. Таким образом, зона захвата достаточно быстро восстанавливается и может отозваться очередным высыпанием на следующий период магнитоакустической МГД-волны. Естественно, что аналогичные явления с той или иной вероятностью могут происходить на всем пути распространения магнитоакустических волн.

3. Экспериментальная установка

На рис. 5 изображена структурная схема модернизированной экспериментальной установки, которая в значительной степени может обеспечить получение основных экспериментальных данных о солнечно-земном физическом процессе. Она создается в пос. Пятихатки в северной части Харькова и является очередным вариантом установки, описанной в работе [4]. Управление осуществляется четырьмя антеннами типа "двойной квадрат", находящихся в горизонтальной плоскости в вершинах прямоугольника со сторонами 60×70 м. Рабочая частота и полоса пропускания управляющих антенн равны соответственно 33 и 6 МГц. Соответствующие радиочастотные тракты заканчиваются формирователями импульсов (по амплитуде и длительности), которые подключены к четырехканальной схеме совпадений. Изменением длительности формирования и разрешающего времени схемы совпадений можно изменять ширину диаграммы направленности четырехэлементной системы от 20 до 700 (соответствующий интервал по разрешающему времени 30÷110 нс), а введением временных задержек в отдельных каналах - качать ее ось. Предусматривается параллельное подключение нескольких идентичных схем совпадений с различными разрешающими временами. Это позволит грубо оценивать угловые размеры излучающих областей и, до некоторой степени, идентифицировать радиовсплески, принадлежащие соседним магнитным силовым линиям. Кроме того, метод совпадений гарантирует защиту от местных радиопомех, которые распространяются под малыми углами к горизонтальной плоскости. Пять радиочастотных трактов, работающих на частотах 38, 74, 120 (с антеннами типа "двойной квадрат"), 240, 362 МГц (с параболическим радиотелескопом диаметром 5 м и облучателем в виде двухзаходной конической спирали) в полосе пропускания 2 МГц, предназначены для измерения спектрального распределения всплесков синхротронного радиоизлучения. Выходные импульсы этих трактов поступают в многоканальное устройство записи информации через временные ворота, которые отпираются выходным управляющим импульсом схемы совпадений. Записываются амплитуда всплеска во всех пяти радиочастотных трактах и время поступления импульсов совпадений. Это позволяет в дальней-

шем производить всестороннюю обработку информации: производить низкочастотный фурье-анализ частоты следования импульсов в составе всплесков и частоты повторения всплесков в пределах всей их серии, строить высокочастотное спектральное распределение в отдельных всплесках и усреднять его по группам и сериям, использовать метод наложения эпох при сравнении с данными других измерений и т.п. Планируется сооружение идентичных экспериментальных установок на территориях Национального центра управления и испытаний космических средств (г. Евпатория, Украина) и Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Российская Федерация). Магнитные долготы всех трех планируемых пунктов наблюдения отличаются не столь значительно, а магнитные широты соответствуют разным дрейфовым магнитным оболочкам: $L \approx 2.4$ (Дубна), $L \approx 1.9$ (Харьков) и $L \approx 1.6$ (Евпатория). Рис. 6 демонстрирует в линейном масштабе меридиональный разрез слоя магнитосферы, охватывающего все три магнитные оболочки. Если внешнее возмущение движется с альвеновской скоростью со стороны головной части магнитосферы (на рисунке - сверху), то эффекты высыпаний сначала должны наблюдаться в Дубне, а затем в Харькове и Евпатории с временным сдвигом в крайних пунктах регистрации около 4 с. Планируемая экспериментальная установка на территории ЦПНИ (Евпатория) должна иметь управляющую систему, идентичную с харьковской. Что касается системы измерения спектрального распределения всплесков радиоизлучения, то она может иметь иной состав антенн. В частности, предполагается использовать малые антенны типа "Кедр" (четырёхэлементная система на базе широкополосных логопериодических антенн метрового и дециметрового диапазонов), средние антенные комплексы МА9-МКТМ4 (две четырехзеркальные системы дециметрового диапазона, каждая из которых имеет общий размер 11×11 м), "Орион" (две 408-элементные антенные решетки размером 10×13 м каждая) и два мощных антенных комплекса АДУ-1000 (полноповоротная фазированная антенная решетка из 8 зеркал общим размером 28×64 м, работающая в режиме приема на длине волны 32 м). При этом средние и мощные антенные комплексы предлагаются к использованию для непрерывного наблюдения Солнца и околосолнечного пространства. Дело в том, что с мощными солнечными вспышками связаны всплески радиоизлучения IV типа в дециметровом и сантиметровом диапазонах [6]. Микроволновые всплески типа IV μ испускаются в начальной (ускорительной) фазе развития солнечной вспышки (в промежутке времени $0 \div 20$ мин от ее начала), дециметровые всплески типа IV dm возникают во время ее взрывной фазы, когда происходят мощные плазменные выбросы (в промежутке времени $0.5 \div 1.5$ ч от начала). Такие солнечные радиовсплески случаются $1 \div 10$ раз в месяц. Таким образом, с помощью евпаторийской экспериментальной установки возможно будет наблюдать за солнечно-земным процессом как на его начальном этапе, так и на заключительной стадии.

Надо сказать, что планируемые в ЦПНИ (Евпатория) исследования Солнца и околосолнечного пространства выходят за рамки наблюдения описанного солнечно-земного процесса. И это понятно: инструментальные возможности ЦПНИ не могут

быть ограничены решением одной задачи. Некоторые из других задач уже обсуждались [7, 8]. Проведено техническое переоснащение антенных систем (и измерение их параметров) с сохранением штатных режимов управления космическими аппаратами. Разработаны методы регистрации и обработки сигналов, визуализации изображений [9–12]. Получены радиоизображения Солнца в картинной плоскости на различных частотах и, соответственно, на различных расстояниях от его фотосферы. Накоплены экспериментальные данные в процессе синхронных наблюдений солнечной активности и корональных дыр в радио- и оптическом диапазонах (ЦПНИ-КрАО). Опыт работы, приобретенный в ЦПНИ при проведении методических и исследовательских измерений на своей инструментальной базе, послужит решению задач в рамках исследования солнечно-земных связей, физики Солнца и гелиосферы.

4. Ожидаемые результаты

Перечислим основные ожидаемые результаты исследования солнечно-земного процесса.

- Характеристики солнечных радиовсплесков типа IV μ и IV δ m (дата, время начала и конца излучения, зависимость интенсивности от времени, поляризация и т.п.).
- Число околоземных всплесков радиоизлучения как функция времени в течение цикла солнечной активности. Суточное число всплесков можно использовать в качестве нового индекса солнечной активности, адаптированного к земным условиям [13].
- Низкочастотное спектральное распределение радиовсплесков по частоте повторения в группах и в сериях как характеристика внешних факторов, возмущающих внутренние зоны захвата заряженных частиц.
- Низкочастотное спектральное распределение импульсов, составляющих радиовсплеск, по частоте их следования как характеристика процесса развития электронно-циклотронной неустойчивости во внутреннем радиационной поясе.
- Временные сдвиги радиовсплесков, наблюдаемых в Дубне, Харькове и Евпатории, как характеристика скорости распространения внешних возмущений в магнитосфере Земли.
- Высокочастотное спектральное распределение в индивидуальных радиовсплесках и среднее по их группам и сериям как характеристика механизма радиоизлучения и энергетического спектра высыпавшихся электронов.
- Дифференциальные энергетические спектры электронов, получаемые из высокочастотного спектрального распределения, в различных интервалах времени развития серии высыпаний как свидетельство возможных ускорительных процессов в возмущенной магнитосфере.
- Радиационная обстановка в возмущенные периоды в пространстве между радиационным поясом и атмосферой Земли.

- Внезапные кратковременные поглощения космических радиозумов на частоте 38 МГц и выше, порождаемые увеличением электронной концентрации в D-слое ионосферы во время высыпаний электронов и протонов.
- Разработка физической модели и проведение численных расчетов переноса электронов в магнитосфере с последующей верификацией расчетов по экспериментальным данным для адекватной интерпретации результатов экспериментов [14, 15].
- Физическая модель солнечно-земного явления в целом и его основных этапов.
- Корреляции медицинских показателей организма человека с проявлениями солнечной активности, которые дают прямые эффекты в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли.
- Магнитные бури, которые могут вызывать на молекулярном уровне организма человека эффекты типа ионно-циклотронных параметрических резонансов, способствующих отделению ионов от биологически важных молекул и их перестройке, нарушению ионного баланса и обмена в клетках [16-18].
- Кратковременные скачки атмосферного давления (100% и более) на высотах мезосферы и стратосферы, порождаемые ионизацией и разогревом воздуха всплесками высыпающихся заряженных частиц. При этом в атмосфере распространяются слабо затухающие акустические колебания давления с периодом 6-8 минут [19].
- Спорадические всплески высокочастотного радиоизлучения, мощность которого уступает мощности различных искусственных источников, однако его глобальный характер и нерегулярная частота повторения могут усилить эффект воздействия на живой организм.

1. Абросимов А. Т., Гусев А. А., Дудник А. В. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, 1991, т. 55, № 10, с. 1915-1919.
2. Дудник А. В., Залюбовский И. И., Карташев В. М. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, 1988, т. 52, № 12, с. 2457-2459.
3. Бережко Е. Г., Ёлшин В. К., Крымский Г. Ф., Петухов С. И. // *Генерация космических лучей ударными волнами*. – Новосибирск: Наука, 1988. -182 с.
4. Карташев В.М., Лазарев А.В., Сорока Д.В., Шматко Е.С. // *Радиофизика и радиоастрономия*. 1997, т. 2, с. 165-174.
5. Хундхаузен А. *Расширение короны и солнечный ветер*. "Мир". Москва. 1976. 302 с.
6. Крюгер А. *Солнечная радиоастрономия и радиофизика*. Москва. "Мир". 1984. 469 с.
7. Власенко В. П., Залюбовский И. И., Маслов В. И. и др. Міжнародна молодіжна науково-практична конференція "Людина і космос": Збірник тез. - Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2001. с.10.
8. Сорокин А. Ф., Томилин Ю. Г., Цюх А. М.. Труды конференции "Солнечная активность и внутреннее строение Солнца", п.Научный, 2001.
9. Власенко В. П., Сорокин А. Ф. Патент Украины № 42195А от 15.10.2001. Бюл. № 9.
10. Маслов В. И., Нестерук В. Н., Сорокин А. Ф. и др. Сборник трудов 6-й Международной конференции "Системный анализ и управление космическими комплексами. Исследование и освоение космоса в наступающем веке". Евпатория, 2001.
11. Сорокин А. Ф., Томилин Ю. Г., Капустин С. А. и др. Конференция "Солнечная активность и параметры ее прогноза". Абстракты докладов. 3-8 июня 2002 г. п. Научный.
12. Власенко В. П., Сорокин А. Ф. Сборник трудов 7-й Международной конференции "Системный анализ и управление космическими комплексами". Евпатория, 2002, с.43.

13. Дудник А. В., Карташев В. М., Лазарев А. В., Шматко Е. С. // *Астрономический циркуляр*, № 1513, октябрь, 1987.
14. Albert J. M. // *J. Geoph. Res.*, 1999, vol. **104**, A2, p. 2429.
15. Черемных О. К., Голобородько В. Я., Резник С. Н. // *Косм. наука и технология*. 2001, т. 7 доп. к № 2, с. 15.
16. Liboff A. R. // *J. Biol. Phys.* 1985. vol. **9**. p. 99.
17. Blackman C. F., Venane S. Q., House D. E., Joines W. T. // *Bioelectromagnetics*. 1985. vol. **6**. p.1.
18. Жадин М. Н. // *Биофизика*. 1996, т. **41**, вып 4, с. 832-849.
19. Дорман Л. И., Козин И. Д. *Космическое излучение в верхней атмосфере*. М.: Наука, 1983, 151 с.

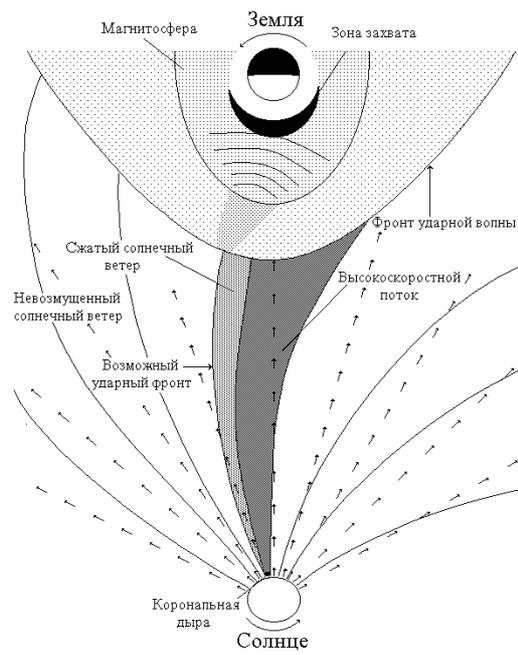


Рис. 1. Высокоскоростной поток в плазме солнечного ветра, вызванный вспышечным выбросом, и его эффекты [5]

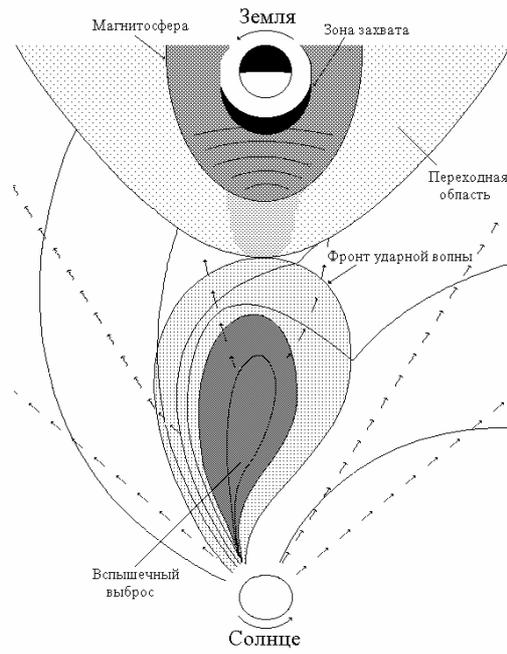


Рис. 2. Высокоскоростной поток в плазме солнечного ветра, берущий начало в экваториальной корональной дыре, и его эффекты [5]

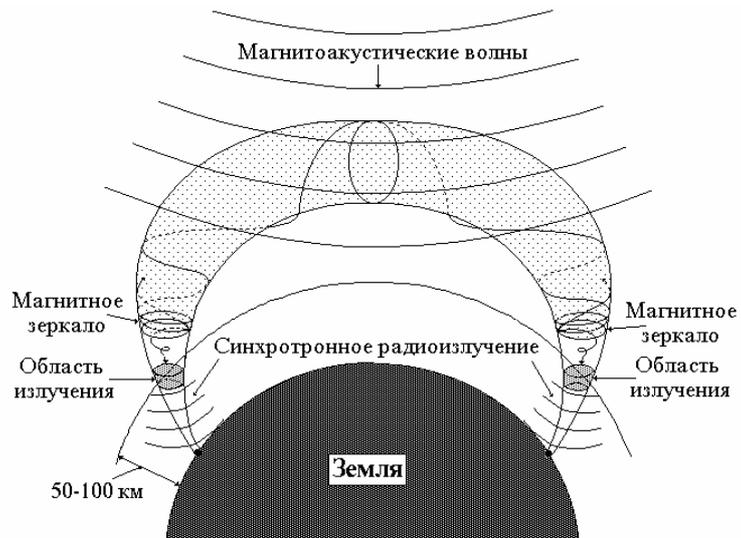


Рис. 3. Локальная зона захвата заряженных частиц, их высыпание и радиоизлучение

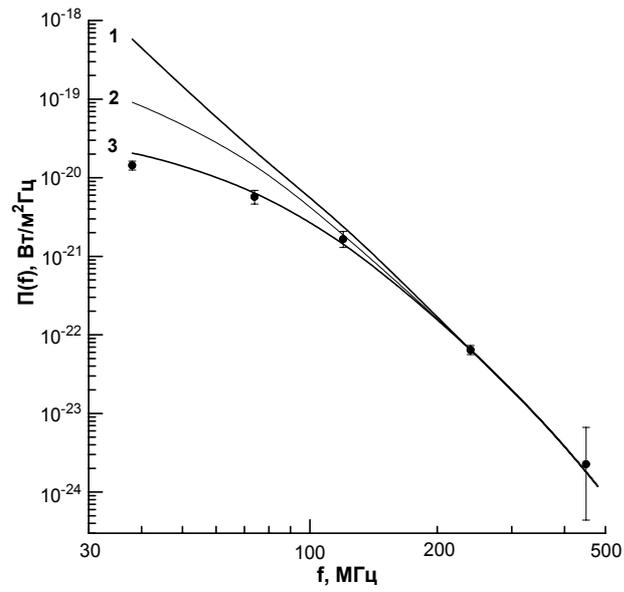


Рис. 4. Спектральная плотность потока мощности частично когерентного синхротронного радиоизлучения высыпающих электронов. Точки - экспериментальные данные, полученные усреднением по 413 всплескам. 1 — расчетная кривая для электронов с дифференциальным энергетическим спектром $\propto E^{-4.5}$ в интервале 0.3-3.0 МэВ, 2 — в интервале 0.7-3.0 МэВ, 3 — в интервале 1.0-3.0 МэВ

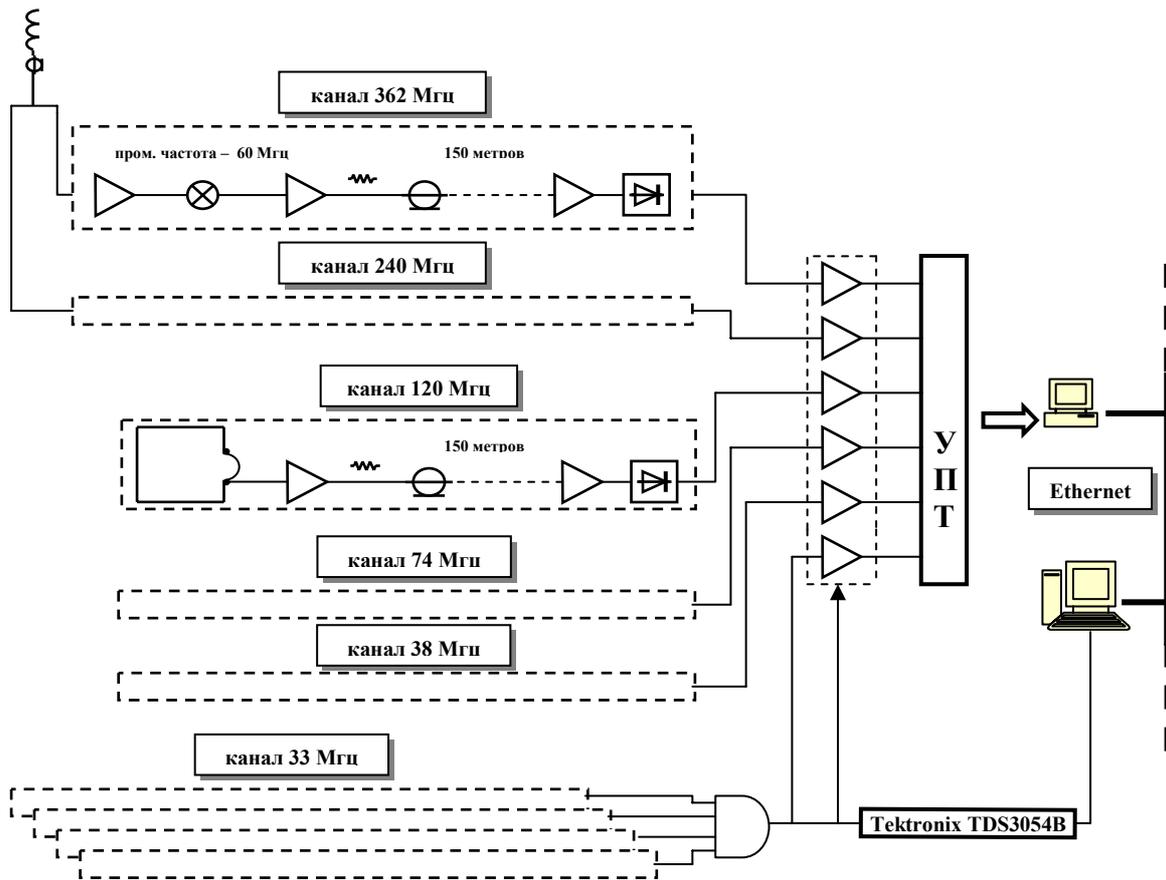


Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки

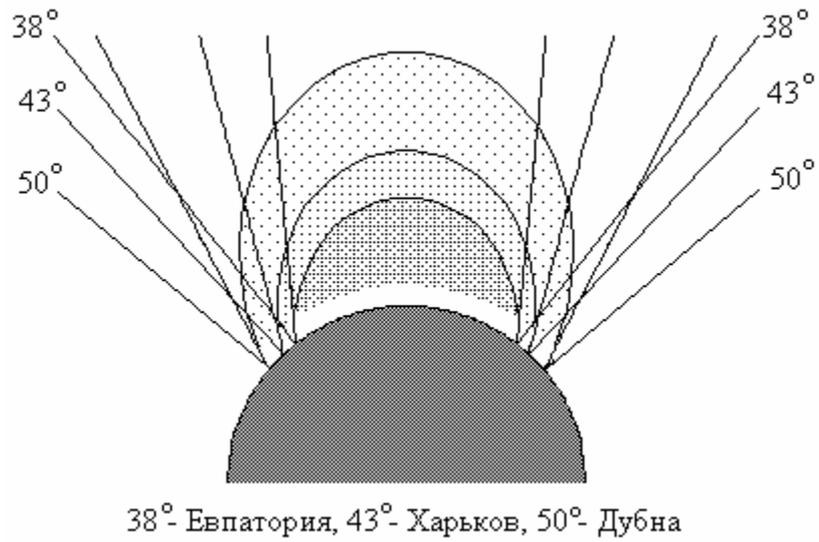


Рис. 6. Меридиональный разрез в линейном масштабе слоя магнитосферы, охватывающего силовые линии Дубны, Харькова и Евпатории. Указаны магнитные широты и проведены касательные к силовым линиям в пунктах наблюдения