

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ
Федеральное государственное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиопизический институт»
(ФГНУ «НИРФИ»)

Е. А. БЕНЕДИКТОВ
И ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В. В. Беликович, Н. В. Бахметьева, А. В. Толмачева

Препринт № 506

Е. А. Бенедиктов
и исследования ионосферы

Оригинал-макет подготовлен
в Редакционно-издательском отделе ФГНУ «НИРФИ»

Подписано в печать 25.04.06. Формат 60x84/16
Бумага писчая. Объем 2.2 усл.п.л.
Тираж 50. Заказ 5558

Беликович В. В.
Бахметьева Н. В.
Толмачева А. В.

Отпечатано в ФГНУ «НИРФИ».
603950 Н.Новгород, ул. Б.Печерская, 25

Нижний Новгород
2006

Е. А. БЕНЕДИКТОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ.
Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Толмачева А. В. //
Препринт №506. – Нижний Новгород: ФГНУ «НИРФИ», 2006. –
36с.

УДК 501

Препринт посвящен Евгению Андреевичу Бенедиктову –
ученому с мировым именем, основателю ряда новых
направлений в исследованиях ионосферы, верхней атмосферы и
распространения радиоволн.

ионосферы методом частичных отражений весной 2004 г. на средних и высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия, 2006. Т. 46 (в печати).

42. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений весной 2004 г. на средних и высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия, 2006. Т. 46 (в печати).
43. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Каган Л. М., Понятов А.А. Заходно-восходные характеристики спорадических слоев ионизации в нижней ионосфере, наблюдаемые методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 1. С. 16–32.
44. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Каган Л. М., Понятов А.А., Толмачева А.В., Келли М.К., Николс М. Дж. Новые результаты исследования нижней ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 757–770.
45. Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Калинина Е. Е., Толмачева А. В. Электронная концентрация в E-области ионосферы: новый способ ее определения по временам релаксации искусственных периодических неоднородностей // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 46 (в печати).



- параметров нижней ионосферы по наблюдениям с помощью искусственных периодических неоднородностей // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 233–242.
36. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Ерухимов Л.М. и др. Новые исследования нелинейных явлений в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 1127–1132.
37. Бахметьева Н.В., Бенедиктов Е.А., Игнатъев Ю.А., Матюгин С.Н., Шавин П.Б. Исследование крупномасштабной области возмущения, возникающей при вертикальном нагреве ионосферы мощным КВ-радиоизлучением, и ее влияние на распространение радиоволн: Препринт № 189. НИРФИ. Горький. 1985.
38. Бахметьева Н.В., Бенедиктов, Е.А., Бочкарев Г.С., Горохов Ю.В., Еременко В.А., Игнатъев Ю.А., Кольцов В.В., Крашенинников В.В., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е., Матюгин С.Н., Черкашин Ю.Н., Шавин П.Б. Изменение дистанционно-частотных характеристик наклонного зондирования в условиях искусственного возмущения верхней ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1985. Т. 25, № 2. С. 233–238.
39. Бахметьева Н.В., Игнатъев Ю.А., Матюгин С.Н., Шавин П.Б. Исследование параметров среднемасштабных неоднородностей методом наклонного зондирования при воздействии на ионосферу полем мощных радиоволн // Геомагнетизм и аэрномия. 1985. Т. 25, № 5. С. 777–783.
40. Бенедиктов Е.А., Брянцев В.Ф., Букин Г.В. Некоторые особенности распространения сигналов на трассах наклонного зондирования // «Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца». 1983. Вып. 63. С.207–212.
41. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А. Исследование D-области

возмущенной F-области ионосферы // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22, вып. 10. С. 497–499.

29. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Иткина М.А., Терина Г.И., Толмачева А.В. О возможности измерения электронной концентрации в ионосфере по рассеянию радиоволн на искусственных неоднородностях плазмы // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 8. С. 1220–1221.
30. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гуляева Т.Л., Терина Г.И. Определение профиля электронной плотности по резонансному рассеянию радиоволн и ионограммам вертикального зондирования // Геомагнетизм и аэронавигация. 1979. Т. 19. № 6. С. 1012–1015.
31. Толмачева А.В. Образование искусственных периодических неоднородностей в магнитоактивной ионосферной плазме // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23, № 3. С. 278–286.
32. Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д., Толмачева А.В. Результаты измерений электронной концентрации в E-области ионосферы в период 1990–1992 гг. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1997. Т. 37, № 5. С. 79–87.
33. Бенедиктов Е.А., Беликович В.В., Бахметьева Н.В., Толмачева А.В. Исследование динамических явлений в E-области ионосферы по измерениям электронной концентрации в осенне-зимние периоды 1990–1992 гг. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1997. Т. 37, № 5. С. 88–98.
34. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Бубукина В.Н., Игнатъев Ю.А. Исследование волновых движений в нижней ионосфере методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 3. С. 308–321.
35. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Григорьев Г.И., Толмачева А.В. Влияние акустико-гравитационных волн на вариации

Евгений Андреевич Бенедиктов – ученый с мировым именем, основатель ряда новых направлений в исследованиях ионосферы, верхней атмосферы и распространения радиоволн.

Е.А. Бенедиктов родился 25 декабря 1928 года в селе Суреево Перевозского района Горьковской области. В 1952 г. он окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета. Научной работой Е. А. Бенедиктов начал заниматься еще в студенческие годы. Его дипломная работа была посвящена особенностям распространения радиоволн в ионосфере. На основе этой работы была опубликована первая научная статья Евгения Андреевича в Ученых записках ГГУ (1954 г.). После окончания университета Е. А. Бенедиктов три года проработал на заводе в Подмоскowie, а в 1955 г. по приглашению профессора В.Л. Гинзбурга поступил в аспирантуру на кафедру распространения радиоволн ГГУ. В 1962 г. он успешно защитил кандидатскую диссертацию.

С 1957г. Е.А. Бенедиктов работал в Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) сначала под руководством выдающегося ученого Г.Г. Гетманцева, затем заведующим отделом Физики ионосферы, а в восьмидесятые годы – заместителем директора НИРФИ по научной работе.

Под руководством и при непосредственном участии Е.А. Бенедиктова была создана экспериментальная база для ионосферных исследований и получен ряд приоритетных результатов.

В шестидесятые годы Е.А. Бенедиктовым и его сотрудниками освоен радиоастрономический метод измерения поглощения радиоволн в ионосфере и проведены многочисленные измерения на средних и высоких широтах с применением рекордно низких частот (6, 9, 13 и 25 МГц). Получены данные о суточном, сезонном и

одиннадцатилетнем ходе поглощения радиоволн, о связи поглощения с активностью Солнца, о внезапных вспышках поглощения, об авроральном поглощении и поглощении в полярных шапках. Одним из важнейших результатов в этом направлении явилось восстановление профилей электронной концентрации в нижней ионосфере по измеренной частотной зависимости аномального поглощения.

В процессе совместных с Г.Г. Гетманцевым и другими сотрудниками исследований ионосферы на первых советских спутниках «Электрон-2» и «Электрон-4» обнаружено спорадическое радиоизлучение ионосферы (позднее названное в иностранной литературе «километровым»). С конца шестидесятых годов в НИРФИ по инициативе Е.А. Бенедиктова активно развивались исследования нижней ионосферы методом частичных отражений. Были созданы уникальные установки, работавшие на двух частотах (3 и 6 МГц), проведены измерения профилей электронной концентрации *D*-области ионосферы на средних и высоких широтах, и в результате разработана эмпирическая модель нижней ионосферы.

В 1975 г. совместно с Г.Г. Гетманцевым и другими сотрудниками им обнаружены искусственные периодические неоднородности ионосферной плазмы, возникающие в поле мощных стоячих радиоволн. На этой основе созданы принципиально новые методы исследования верхней атмосферы и положено начало новому научному направлению – диагностике ионосферной плазмы методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях. Этим методом получены новые сведения об электронной концентрации в долине между *E*- и *F*- областями ионосферы, о скоростях вертикальных движений плазмы в нижней ионосфере, о концентрации атомного и возбужденного кислорода на высотах, ниже 100 км. Создание этого направления исследований

20. Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Митяков Н. А., Рапопорт В.О., Тарасов А. Ф. Вариации среднего уровня радиоизлучения на частотах 1,1 и 2,3 МГц по измерениям на ИСЗ «Электрон-4». Космические исследования. 1969. Т. 7, вып. 1. С. 156–157.
21. Gardner F. F., Pawsey J. L. Study of the Ionospheric D region using partial reflection // J. Atmos. Terr. Phys. 1953. V. 3, № 6. P. 321–324.
22. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д., Лернер А.М.. Эмпирическая модель распределения электронной концентрации среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32, № 6. С. 95–103.
23. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Иткина М.А. Эффективный коэффициент потерь в D-области ионосферы во время внезапных ионосферных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т 17, № 10. С. 1469–1477.
24. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д., Гончаров Н.П., Гришкевич Л.В., Васильев Е.Б., Мизун Ю.Г. Профили электронной концентрации в нижней ионосфере высоких широт // «Высокоширотная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи». Апатиты: ПГИ КФ АН СССР, 1986. С 134–140.
25. Виленский И.М. Об одном нелинейном эффекте при распространении радиоволн в ионосфере // Доклады АН СССР. 1970. Т. 191, N 5. С. 1041–1043.
26. Виленский И.М., Плоткин В.В. Об отражении мощных радиоволн от нижней ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 6. С. 886–891.
27. Seliga T.N. Phenomena associated with very high power high frequency F-region modification below the critical frequency // J. Atmos. Terr. Phys. 1972. V. 34, No 10. P. 1827–1841.
28. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Игнатьев Ю.А., Комраков Г.П. О рассеянии радиоволн от искусственно

12. Беликович В.В., Иткина М.А. Использование показателя частотной зависимости поглощения радиоволн в *D*-слое ионосферы для нахождения $N(h)$ -профиля // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14, № 10. С. 1471–1476.
13. Бенедиктов Е.А., Беликович В.В., Гришкевич Л.В., Вяхирев В.Д., Толмачева А.В. Авроральное поглощение радиоволн в умеренных широтах во время мировых магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. 1992. Т. 32. С. 155–159.
14. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Рапопорт З.Ц. ППШ в июле, августе и сентябре 1966 г. по наблюдениям в авроральной зоне // Геомагнетизм и аэрномия. 1969. Т. 9, № 4. С. 667–673.
15. Беликович В.В., Белобородова А.А., Бенедиктов Е.А., Шабанов Ю.А. Поглощение в полярной шапке в апреле 1969 г. // «Геофизические явления в полярных областях». Якутск.: 1973. С. 107–111.
16. Бенедиктов Е. А. Вековой ход интенсивности источника Кассиопея А на частоте 13 МГц. // Астроном. журн. 1975. Т. 52, вып. 2. С. 441–442.
17. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Коробков Ю. С. О спектре дискретных источников Кассиопея А и Лебедь А в декаметровом диапазоне волн. // Астроном. журн. 1967. Т. 44, №. 5. С. 981–983.
18. Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Митяков Н. А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю. А., Тарасов А. Ф. Результаты измерений интенсивности радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц при помощи аппаратуры, установленной на спутнике «Электрон-2» // «Исследование космического пространства». М.: Наука, 1965. С. 581–606.
19. Benediktov E. A., Getmantsev G. G., Mityakov N. A., Rapoport V.O., Sazonov Yu. A., Tarasov A. F. // Space research. 1966. V. 110, №6.

является наиболее ярким достижением Е.А. Бенедиктова. Приоритет нового метода исследований признан мировой наукой.

Е.А. Бенедиктовым опубликовано около 300 научных работ. В их числе монография "Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей" [1]. В 2002 г. она была переведена на английский язык и издана в Германии [2]. Е.А. Бенедиктов получил 6 авторских свидетельств на способы измерения различных параметров ионосферной плазмы. Под его руководством выполнены десятки НИР, защищены 6 кандидатских диссертаций.

Заслуги Е.А. Бенедиктова были отмечены орденом «Знак почета» (1976 г.), медалью «За доблестный труд» и серебряной медалью ВДНХ.

Вся жизнь и научная деятельность Е.А. Бенедиктова являются достойным примером служения науке. Евгения Андреевича отличала исключительно высокая требовательность к себе. Он обладал качествами, присущими настоящим ученым. Его идеи были глубоко продуманы и хорошо сформулированы. Экспериментальная работа всегда серьезно подготовлена. О его дотошности и тщательности в обработке данных (которой он нередко занимался лично) помнят все его коллеги. Известно, что даже в хороших добросовестных публикациях при исследовании новых явлений авторы допускают ту или иную степень риска. Евгений Андреевич занимал в этом вопросе крайнюю позицию и результаты, изложенные в публикациях его коллектива, всегда можно было считать истиной в последней инстанции. При изложении результатов исследований, их анализе и интерпретации он всегда добивался физической ясности и убедительности. Такое же отношение к научной работе он прививал своим ученикам и младшим коллегам, притом, с педагогическим талантом и дипломатическим тактом.

Е.А. Бенедиктов не был «однобоким специалистом», сосредоточенным только на науке. У него был живой и общительный

характер, широкий круг интересов. Вызывала симпатию окружающих его людей любовь к природе нашего края и к нашему городу. Его отзывчивость и скромность вызвали глубокое уважение. Трагуемый в настоящее время достаточно широко термин «порядочность» применим по отношению к Евгению Андреевичу в его изначальном смысле без всяких скидок. Он никогда не шел на компромиссы в вопросах, которые считал принципиальными.

5. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В. Поглощение радиоволн в ионосфере умеренных широт в течение цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. 1975. Т. 15. С. 251-254.
6. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Связь аномального поглощения радиоволн в периоды внезапных ионосферных возмущений с зенитным углом Солнца // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 6. С. 840–844.
7. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Некоторые статистические характеристики внезапных ионосферных возмущений и распределение геоактивных хромосферных вспышек по диску Солнца // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 8. С. 1133–1137.
8. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Частотная зависимость аномального поглощения радиоволн в периоды внезапных ионосферных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 1475–1481.
9. Разработка эмпирической модели среднеширотной D-области ионосферы в спокойных условиях и во время внезапных ионосферных возмущений. Отчет НИРФИ. 1985. Научный руководитель Бенедиктов Е.А. № гос. регистрации 81102477, Горький. 174
10. Белобородова А.А., Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Петрова Г.А., Пятси З.М., Рапопорт З.Ц., Толмачева А.В. Аномальное поглощение космического радиоизлучения в авроральной зоне в период МГСС. // «Ионосферные исследования». М.: Наука. 1972. N 20. С. 75–84.
11. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Иткина М.А. Результаты определения профиля электронной концентрации в D-области ионосферы по частотной зависимости поглощения радиоволн // Геомагнетизм и аэрномия. 1971. Т. 11, № 2. С. 268–274.

Предложены новые способы диагностики ионосферы методом резонансного рассеяния на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. Доказана возможность определения концентрации и вида металлических ионов, ответственных за образование спорадических слоев ионизации. Предложен новый метод определения электронной концентрации в *E*-области ионосферы по измерениям времен релаксации ИПН на двух частотах [45], и проведены первые измерения этим методом.

Эти исследования неоднократно поддерживались Российским фондом фундаментальных исследований. В последние годы при финансовой поддержке РФФИ выполняются гранты № 04-05-64140, 02-05-65281, 05-05-64111.

Авторы благодарят В.О. Рапопорта за ряд полезных замечаний при подготовке рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. 150 с.
2. Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmet'eva N.V. Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities. Katlenburg-Lindau: Copernicus, 2002. GmbH, ISBN 3-936586-03-9, 160 p.
3. Mitra A.P., Shain C.A. The measurements of ionospheric absorption using observation of 18.3 Mc/s cosmic noise. // J. Atmos. Terr. Phys. 1953. V. 4. P. 204–218.
4. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Результаты измерений величины поглощения в ионосфере в пределах полуцикла солнечной деятельности // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8. С. 462–470.

1. Начало ионосферных исследований

Еще в 1954 г. по инициативе В.Л. Гинзбурга ручная ионосферная станция кафедры «Распространение радиоволн» была переведена на загородный полигон ГИФТИ «Зименки». Здесь под руководством Л.В. Гришкевича начались регулярные исследования ионосферы, которые продолжились в НИРФИ. Кроме Л.В. Гришкевича в них принимали активное участие Н.А. Митяков, Л.А. Скребкова, Л.А. Ходалева, В.А. Васин. С помощью ионосферной станции определялись высотно-частотные характеристики и измерялось поглощение радиоволн в нижней ионосфере. Леонида Владимировича Гришкевича, вместе с Е. А. Бенедиктовым, по праву можно считать основателями ионосферного направления в НИРФИ. Заметим здесь, что Л.В. Гришкевичем были организованы и проведены измерения скоростей движения ионосферных неоднородностей.



*Сотрудники отдела № 12:
С. Н. Матюгин, В.В. Беликович, Е. А. Бенедиктов, Л. В. Гришкевич*

В 1957–1958 гг. в период Международного геофизического года (МГГ) в НИЗМИР (ныне Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН) был выпущен первый советский серийный ионозонд «Автоматическая ионосферная станция» (АИС), и организована сеть ионосферных станций Советского Союза. Эти станции вошли в первую сеть глобальных ионосферных наблюдений. АИС №1 была установлена на полигоне НИРФИ Зименки. Е. А. Бенедиктовым и Л. В. Гришкевичем была организована работа АИС в круглосуточном режиме и, по существу, создана ионосферная служба. В дальнейшем эту службу возглавил Л. В. Гришкевич. Кроме наблюдений производилась регулярная обработка высотно-частотных характеристик. Полученные ионосферные данные направлялись в Международный центр данных (МЦД) и использовались для прогноза радиосвязи. Эта служба прекратила свое существование в 1992 году.



Домик с ионосферной станцией АИС

Заключение

Основные направления исследований, фундамент которых был заложен по инициативе Е.А. Бенедиктова и под его руководством, продолжают развиваться.

Исследования нижней ионосферы методом частичных отражений возобновлены на качественно новом уровне (см. выше). Для регистрации сигналов и обработки измерений используются современные компьютерные технологии. Налажено сотрудничество с Полярным геофизическим институтом КНЦ РАН, имеющим установку частичных отражений с похожими параметрами, для сравнительного изучения полярной и среднеширотной ионосферы [41, 42].

Исследования последних лет, проведенные учениками Е.А. Бенедиктова, позволили получить новые сведения о нижней ионосфере. Было установлено, что в спокойных и возмущенных условиях концентрация электронов в области D пропорциональна интенсивности ионизирующего излучения $N \sim q$. Поскольку господствующие аэрономические теории предсказывают зависимость $N \sim \sqrt{q}$, то высказана гипотеза о том, что основной процесс потерь электронов в области D обусловлен не диссоциативной рекомбинацией, а рекомбинацией электронов и ионов на аэрозольных и пылевидных частицах.

Продолжаются и совершенствуются исследования методом резонансного рассеяния на искусственных периодических неоднородностях. Проведены измерения, позволяющие изучать поведение ионосферной E -области и ее динамику. Наиболее интересными исследованиями, сделанными в последние годы, являются изучение поведения D - и E -областей ионосферы в периоды захода и восхода Солнца и изучение динамики спорадических слоев [43, 44].

наклонного и возвратно-наклонного зондирования, исследовалась возможность управления процессом распространения радиоволн. В первых экспериментах нагрев ионосферы осуществлялся стендом "Ястреб" в Зименках. С вводом в строй стенда СУРА эксперименты были продолжены с существенно большей мощностью. Одним из важнейших результатов при нагреве F -области ионосферы был эффект увеличения максимально применимой частоты среднеширотной трассы протяженностью 1000 км. Этот эффект был следствием возникновения искусственной возмущенной области при воздействии на ионосферу излучением мощного наземного радиосредства [38]. Другим важным результатом было обнаружение и исследование искусственных среднемасштабных анизотропных неоднородностей ионосферной плазмы с поперечным относительно направления геомагнитного поля масштабом в сотни метров [39]. Эти эксперименты продолжались вплоть до начала 90-х годов, когда почти полное отсутствие финансирования сделало дальнейшее продвижение в этом направлении невозможным.

К нагревным исследованиям на среднеширотных трассах вплотную примыкает исследование сверхдальнего распространения радиоволн, проводившееся В.Ф. Брянцевым при всемерной научной и организационной поддержке Е.А. Бенедиктова. В двух океанских экспедициях на НИС "Боровичи" в 1975 г. и "Кегостров" в 1980 г. было проведено более 10000 сеансов измерений на дальних и сверхдальних трассах различной протяженности и ориентации, кругосветных и в антиподе. Выявлены и классифицированы основные типы сигналов, проведены регулярные исследования так называемых боковых экваториальных сигналов в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах [40]. Полученные в результате экспедиций результаты послужили основой для создания банка данных по сверхдальному распространению КВ радиоволн.



*Е. А. Бенедиктов
в первые годы работы в НИРФИ*

Начало научной работы Е. А. Бенедиктова в НИРФИ (1957 г.) связано с измерениями космического радиоизлучения (КР) в низкочастотной области спектра, которые были инициированы В.Л. Гинзбургом и Г.Г. Гетманцевым. Для определения интенсивности КР необходимо учитывать интегральное поглощение радиоволн в ионосфере, быстро возрастающее при уменьшении частоты. Естественно, что и «обратная» задача – экспериментальное исследование ионосферы по измерениям интенсивности КР – также была перспективной.

В конце пятидесятых – начале шестидесятых годов в НИРФИ был успешно освоен и применен радиоастрономический метод исследований ионосферы.

В дальнейшем деятельность Е. А. Бенедиктова была связана, в основном, с ионосферными исследованиями. Под его руководством создавалась и развивалась экспериментальная база для этих исследований. В 1965 г. в НИРФИ был организован отдел Физики ионосферы (отдел № 12), который он возглавил.



Отдел 12 в 1984 году. Зименки.

Верхний ряд. Слева направо: Л.А. Тихонова, А.В. Толмачева, И. С. Захватов, Р.В. Курицин, Н. А. Морозова, Л.М. Елхина, Н.В. Кунтеникова, Н.П. Гончаров, Г.С. Коротина, Е.А. Бенедиктов, Л. Н. Казакова, З. И. Потемкина, Н. К. Шичкова, П.Б. Шавин.
Нижний ряд: В.А. Егорова, В.Н. Бубукина, Н.В. Бахметьева, И.В. Попков, В.Д. Вахирев, С.А. Дмитриев, Ю.А. Игнатьев, В.Ф. Брянецев.

доступном измерением другими методами. Был получен богатый экспериментальный материал о вертикальных движениях на высотах **D**-слоя и нижней части **E**-слоя ионосферы, позволивший перейти к исследованию атмосферных волн на этих высотах, в частности, акустико- и внутренних гравитационных волн [34, 35]. В конечном счете, именно энтузиазм Е. А. Бенедиктова, использование всей экспериментальной базы отдела физики ионосферы, созданной под его руководством, а также установок по модификации ионосферы в Зименках «Ястреб» и в Васильсурске «Сура» сделали возможным прорыв в исследовании ионосферы и атмосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Приоритет этих исследований признан в мире.

Разработка методов диагностики ионосферы и атмосферы путем резонансного рассеяния на ИПН, введение их в практику исследований и получение затем новых результатов является главным достижением Е.А. Бенедиктова и воспитанных им ученых.

7. Исследования крупномасштабной области возмущения, возникающей при нагреве ионосферы мощным радиоизлучением

Еще одно важное направление исследований, связанное с модификацией ионосферы мощным радиоизлучением, было начато в отделе под руководством Е.А. Бенедиктова в 70-е годы. Это направление связано с исследованием крупномасштабной возмущенной области, возникающей при нагреве ионосферы мощным КВ радиоизлучением, и ее неоднородной структуры. Большой вклад в дальнейшее развитие этих исследований внес Ю.А. Игнатьев [36, 37].

На специально организованной системе радиотрасс различной протяженности – от коротких (порядка 200 км) до кругосветных – изучалось влияние нагрева ионосферы на характеристики сигналов

сигналов: амплитуды, фазы и их изменения с высотой и во времени. По этим характеристикам можно рассчитать параметры ионосферной плазмы и атмосферы.

С 1986 г. в НИРФИ ведутся целенаправленные исследования по диагностике ионосферной плазмы с помощью ИПН. Предложен ряд способов определения важнейших параметров ионосферной плазмы: скорости вертикального движения, температуры и плотности атмосферы на высотах области *E*, времени рекомбинации электронов с ионами в *D*-области [1]. Рассмотрена возможность определения параметра λ – отношения концентраций отрицательных ионов и электронов в нижней ионосфере. Дальнейшие работы были посвящены результатам совместного определения *N(h)*-профилей методом частичных отражений и с помощью ИПН, разработке методик определения температуры и плотности атмосферы. Эти способы подробно рассмотрены в монографии [1].

В 1990 г. Евгений Андреевич предложил осуществить продолжительный цикл измерений ионосферных и атмосферных параметров: профилей электронной концентрации, скоростей вертикальных движений, температуры и плотности нейтральной атмосферы с помощью ИПН. Под его руководством эти измерения были проведены в лаборатории Зименки, начиная с осени 1990 г. по апрель 1992 г. Наблюдения проводились каждый месяц в течение 5–10 дней (кроме летнего сезона). В настоящее время, когда цикл измерений составляет несколько дней, трудно поверить в такой масштаб экспериментальной работы! Были получены новые замечательные результаты. Среди них стоит отметить исследование межслоевой впадины (долины) между *E*- и *F*- слоями, практически недоступной измерениям другими наземными методами, в том числе, нестабильной нижней границы долины [32, 33]. В процессе анализа данных была разработана методика получения температуры и плотности атмосферы в высотном интервале 95–120 км, также трудно

2. Исследования ионосферы радиоастрономическим методом

Измерения поглощения радиоволн в ионосфере радиоастрономическим методом (иначе метод А2) проводились в НИРФИ несколько десятилетий, начиная с 1959 г. до конца 80-х годов. Из известных нам наблюдений – это наиболее длительный цикл.

Определение величины поглощения методом А2 основано на измерениях принимаемой на Земле интенсивности распределенного космического радиоизлучения. Впервые этот метод был применен Митра и Шайном в 1953 г. [3] на частоте 18,6 МГц с помощью созданного ими риометра.

Использование такой техники дает важные количественные сведения об интегральном поглощении коротких радиоволн в ионосфере и его морфологии. Кроме того, радиоастрономический метод очень удобен для исследования аномального поглощения радиоволн, возникающего при спорадической ионизации нижней ионосферы, обусловленной различными проявлениями солнечной активности. В периоды МГГ (1957–1958 гг.) и МГСС (1964–1966 гг.) риометры на частотах 32 и 40 МГц широко применялись для исследования авроральной и полярной ионосферы и до сих пор остаются полезным средством ее изучения. Методом А2 довольно подробно изучены различные аномальные явления: внезапные ионосферные возмущения (ВИВ), связанные с рентгеновским излучением солнечных вспышек, авроральное поглощение (АП), вызванное дополнительной ионизацией нижней ионосферы корпускулярными потоками заряженных частиц во время мировых магнитных бурь и суббурь, а также поглощение в полярной шапке (ППШ). В НИРФИ были созданы установки для измерения интегрального поглощения радиоволн на нескольких частотах. Первоначально эти измерения проводились на частоте 18,6 МГц, затем последовательно появлялись частоты 25, 13, 9 и 6 МГц. По

сравнению с аналогичными зарубежными исследованиями здесь имели место два выигрышных фактора. Применение более низких частот: 6, 8, 9 и 13 МГц позволяло измерять аномальное поглощение с меньшими величинами и увеличивало, таким образом, чувствительность метода. Применение многочастотных измерений также привело к прогрессу. В частности, появилась возможность определения электронной концентрации в нижней ионосфере в периоды аномального поглощения. В области классической радиоастрономии использование низких частот впервые позволило получить данные об интенсивности космического радиоизлучения в длинноволновой области.

Исследования ионосферы радиоастрономическим методом велись в двух направлениях: измерения регулярного поглощения в ионосфере и изучение аномального поглощения.

Регулярное поглощение

Измерения регулярного поглощения радиоволн в ионосфере в умеренных широтах (в загородной лаборатории Зименки) продолжались более 14 лет (почти полтора 11-летнего цикла солнечной активности). Была обнаружена инверсия сезонной зависимости интегрального поглощения. В годы низкой солнечной активности наибольшие величины поглощения наблюдались в летние месяцы, а минимальные – зимой. В период высокой солнечной активности максимум поглощения наблюдается зимой, а минимум – летом. Инверсия сезонной зависимости связана с возрастанием поглощения в *F*-области ионосферы в годы высокой солнечной активности. Подтверждена также корреляция величины интегрального поглощения с потоком солнечного радиоизлучения в 10-сантиметровом диапазоне [4, 5].

Были организованы и проведены продолжительные циклы измерений поглощения методом А2 в высоких широтах: в 1964-1966 гг. в Лопарской ($\varphi = 68^\circ \text{ N}$), в 1968–1969 гг. в Архангельске ($\varphi = 64,5^\circ$

Именно Е.А. Бенедиктов первым оценил новые возможности применения этого явления для ионосферных исследований. Рассеяние волн на искусственно создаваемых периодических структурах при соблюдении условий Брэгга за счет когерентного сложения полей от отдельных неоднородностей позволяет оптимально использовать энергетический потенциал диагностической техники и проводить измерения с высоким пространственным разрешением.

Благодаря теоретическим и экспериментальным исследованиям, проведенным в НИРФИ [1], было выяснено, какие физические процессы приводят к образованию ИПН. Оказалось, что в разных слоях ионосферы образование ИПН определяется различными процессами. Так, в области *F* причиной образования периодических неоднородностей является пондеромоторная стрикционная сила, в области *E* они создаются под действием избыточного давления электронной компоненты плазмы, нагретой в пучностях стоячей радиоволны. В области *D* процесс образования ИПН обусловлен изменением скоростей аэрономических реакций, в частности, ростом коэффициента прилипания электронов к молекулам кислорода. Эти исследования позволили разработать новые методы диагностики ионосферной плазмы и атмосферы. В 1978 г. был предложен способ измерения электронной концентрации [29], а позднее проведены первые измерения [30]. Изучение особенностей образования ИПН в замагниченной плазме [31] позволило разработать способ определения ионной и электронной температур в области *F*.

Основой всех способов диагностики ионосферы с помощью ИПН является воздействие на ионосферную плазму мощной стоячей радиоволной. Оно приводит к возникновению искусственных периодических неоднородностей. Зондирование ИПН пробными радиоволнами, прием и регистрация сигналов, рассеянных неоднородностями, позволяет определить характеристики этих

6. Искусственные периодические неоднородности ионосферной плазмы как новое средство ее диагностики

В ряде теоретических работ ([25–27] указывалось на возможность создания искусственных периодических неоднородностей плазмы (ИПН) при отражении мощной радиоволны от F -области ионосферы. Однако только экспериментальное обнаружение ИПН и теоретическое рассмотрение механизма их образования в разных высотных областях ионосферы позволило применить это явление для ионосферных исследований. Возникло новое научное направление: диагностика ионосферной плазмы и атмосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей.

Экспериментально ИПН были впервые обнаружены в ходе исследований по модификации ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением в НИРФИ, которые были начаты по инициативе Г.Г. Гетманцева. Под его руководством с целью изучения воздействия мощного радиоизлучения на ионосферную плазму в 1975 г. был создан нагревный стенд "Ястреб", а через несколько лет – стенд "Сура", вошедший в список уникальных установок России.

В 1975 г. было обнаружено, что при воздействии на ионосферу радиоизлучением обыкновенных радиоволн с частотой 4,6 МГц наблюдается дискретное рассеяние пробных радиоволн необыкновенной поляризации в узком интервале высот F -области ионосферы. Это явление интерпретировалось как рассеяние от искусственных периодических неоднородностей [28]. В последующих экспериментах было показано, что ИПН формируются в поле стоячей волны, возникающей вследствие интерференции падающей на ионосферу и отраженной от нее волн, в высотном интервале от ~ 60 км до точки отражения мощной радиоволны от ионосферы.

N) и в Тикси ($\varphi = 71,6$ N). В отсутствие магнитных возмущений поглощение в авроральной зоне не имеет особенностей, по сравнению с умеренными широтами. Это означает, что величины регулярного поглощения в Лопарской, в Архангельске и Зименках практически одинаковы при одних и тех же зенитных углах Солнца. Следовательно, в магнитоспокойные периоды в полярных областях нет дополнительных источников ионизации.

Аномальное поглощение

Внезапные вспышки поглощения (ВВП) вызываются дополнительной ионизацией нижней ионосферы под действием рентгеновского излучения солнечной вспышки. Более 600 ВВП было зарегистрировано радиоастрономическим методом в течение 20 лет (1964–1984 гг.). Была получена зависимость величины поглощения от зенитного угла Солнца $\Gamma \propto \cos^k \chi$, где $k \approx 0,9–1,2$ [6]. Очень интересным, на наш взгляд, является изучение распределения по диску Солнца геоактивных хромосферных вспышек, вызывающих внезапные ионосферные возмущения [7]. Обнаружена широтная асимметрия таких вспышек на солнечном диске. В период максимума солнечной активности такие вспышки регистрировались в среднем в 3,5 раза чаще в северном полушарии, чем в южном. В годы, близкие к минимуму – почти в 20 раз чаще. При этом степень асимметрии не зависит от интенсивности возмущения.

Исследование частотной зависимости поглощения во время ВВП ($\Gamma \propto f^{-n}$) показало [8], что n лежит в пределах от 1,5 до 2,0, причем, разброс значений связан в значительной степени с различием спектров рентгеновского излучения. Средние значения n уменьшаются от $n = 1,9–1,95$ для рабочих частот 13–25 МГц до $n = 1,8–1,82$ для частот 9–13 МГц.

На базе этих исследований была разработана модель возмущенной D -области [9].

Авроральным поглощением (АП) называют аномальное поглощение радиоволн, возникающее в зоне полярных сияний в результате ионизации нижней ионосферы потоками высыпавшихся электронов. В период минимума солнечной активности (1964-1966 гг.) были проведены измерения поглощения в авроральной зоне (Лопарская) на частотах 9, 13, 25 и 40 МГц. Применение низких частот позволило учесть небольшие возмущения с целью уточнения статистических характеристик аврорального поглощения [10]. Аномальное поглощение с величиной $\Gamma \geq 1$ дБ на частоте 9 МГц регистрировалось около 30% всего времени. Суточный ход для сравнительно слабых возмущений имел максимум в околополуденные часы и минимум ночью во все сезоны года. Интенсивные возмущения с максимальной величиной поглощения $\Gamma_m \geq 10$ дБ на частоте 9 МГц чаще регистрировались в утренние и ночные часы. При этом, в сильно возмущенные дни аномальная ионизация происходила почти непрерывно: величины поглощения, большие чем 1 дБ, регистрировались в 65-75% всего времени, а величины $\Gamma > 7-10$ дБ – в течение 10% времени наблюдений.

Наиболее часто АП регистрировалось в дневные часы суток. По мере увеличения интенсивности имела тенденция к смещению максимума вероятности появления в сторону утренних и ночных часов. Наименьшая вероятность появления АП имела место в вечерние часы (19–22ч местного времени).

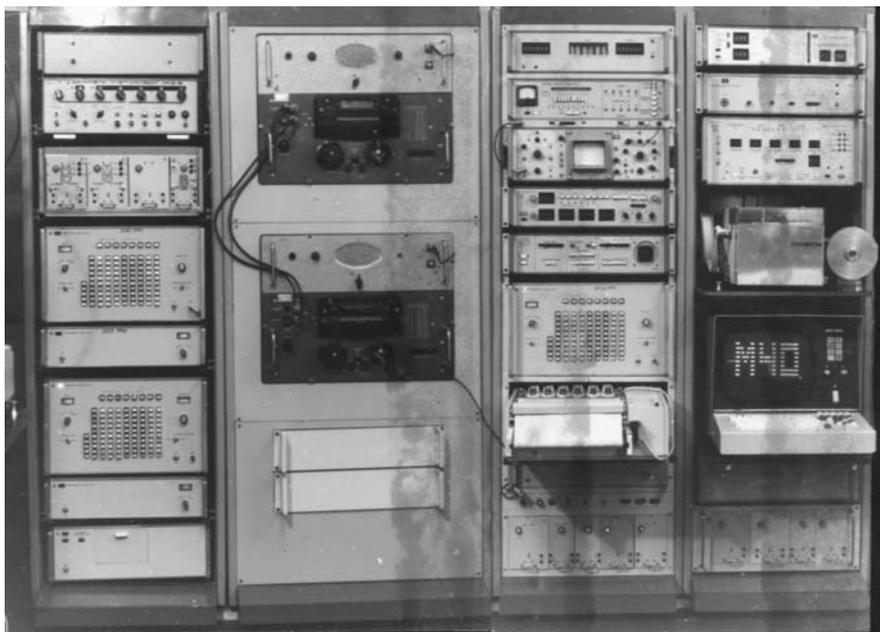
Таким образом, были получены статистические характеристики этих явлений и, кроме того, изучены их индивидуальные особенности, географическое распределение, динамика, связи с геомагнитной и солнечной активностью.

Подробно исследована частотная зависимость АП. Частотная зависимость определяется, в первую очередь, формой профиля электронной концентрации в **D**-области ионосферы и высотой его максимума, обусловленными спектром потока ионизирующих

Самый большой массив данных был получен этим методом в восьмидесятые годы: более 2000 профилей электронной концентрации в различных геомагнитных условиях. Исследования проводились не только в Зименках, но и на авроральных широтах (в поселке Туманный Мурманской области), и на крайнем юге вблизи Душанбе. Измерения проводились с помощью специально созданного экспедиционного варианта аппаратуры. На этой основе была разработана эмпирическая модель высотного профиля электронной концентрации в среднеширотной **D**-области ионосферы [22]. Кроме того, были определены высотные профили электронной концентрации и коэффициента потерь электронов во время солнечных вспышек [23] и измерена электронная концентрация в периоды магнитных возмущений в авроральной ионосфере [24]. Исследовалась также зимняя аномалия области **D**.

Начало 90-х годов сопровождалось катастрофическим сокращением экспериментальных исследований и утратой всего измерительного комплекса МЧО на территории загородной лаборатории Зименки. Сохранился только экспедиционный вариант аппаратуры, находившийся на территории загородной лаборатории Васильсурск. Новый этап в развитии экспериментальных исследований ионосферы методом частичных отражений начался в 1996 г. Благодаря поддержке Немецкого научно-исследовательского общества (ННИО) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), было получено компьютерное оборудование на сумму 10000 DM. Это оборудование позволило восстановить исследования МЧО на качественно новом уровне с цифровой регистрацией сигналов в 12-разрядном двоичном коде и шагом по высоте около одного километра. Современные компьютерные технологии позволили улучшить методику обработки принятых сигналов и, в частности, использовать метод когерентного накопления, который снижает уровень помех на 15–20 дБ.

на частоту 3 МГц, имеющая 16 элементов. Изготовлен передатчик с выходной мощностью в импульсе 100 кВт.



Приемный комплекс МЧО

На базе ленточного перфоратора ПЛ-150 создано устройство регистрации рассеянных сигналов на перфоленту. Одновременно совершенствовалась теория обратного рассеяния радиоволн применительно к методу частичных отражений и разрабатывались методики определения ионосферных параметров. В частности, была предложена и опробована методика расчета профиля электронной концентрации по высотной зависимости коэффициента корреляции амплитуд сигналов обыкновенной и необыкновенной компонент, предложена частотно-корреляционная методика определения профиля электронной концентрации и методика обработки экспериментальных данных с усреднением логарифмов амплитуд.

частиц. Наблюдения показали также, что вследствие неоднородности области повышенной ионизации в пределах диаграмм направленности приемных антенн показатель частотной зависимости n может уменьшаться. Впервые был разработан метод получения профиля электронной концентрации в возмущенных условиях по частотной зависимости аномального поглощения. [11, 12].

Отдельно были изучены явления аврорального типа, наблюдавшиеся в умеренных широтах (в районе Нижнего Новгорода) в периоды мировых магнитных бурь (см., например, [13]).

Поглощение в полярной шапке вызывается высокоэнергичными протонами и α -частицами, потоки которых приходят от Солнца во время сильных вспышек. ПППШ наблюдалось с помощью установок НИРФИ в Лопарской, в Архангельске и Тикси [14, 15]. Была обнаружена восходно-заходная асимметрия суточного хода поглощения. При одинаковых зенитных углах величина поглощения в утренние часы оказалась ниже, чем в вечерние. Отмечен ступенчатый рост поглощения на восходе Солнца, указывающий на наличие двух механизмов в процессе отлипания электронов от отрицательных ионов в **D**-области ионосферы. Исследование частотной зависимости ПППШ для ряда событий показало, что значения n в ночные часы составляли 1,9–2, а днем уменьшались до 1,2–1,5. Этот факт указывает на существование дополнительной ионизации ниже уровня 60–70 км.

Следует отметить, что эти исследования были важными для практики радиосвязи. В особенности, это относится к полярным областям, где в периоды высокой солнечной и магнитной активности часто наблюдаются нарушения КВ-радиосвязи, и большое значение имеют оценки ее надежности.

3. Наблюдения источников космического радиоизлучения

Одновременно с ионосферными продолжались радиоастрономические исследования. Среди них следует упомянуть два важных, на наш взгляд, результата. Регулярные измерения поглощения методом А2 позволяли определять интенсивность как распределенного космического радиоизлучения, так и радиоизлучения отдельных источников: Кассиопеи А и Лебеда А. В работе [16] исследован вековой ход интенсивности источника Кассиопея А в декаметровом диапазоне волн по измерениям в течение почти 10 лет (1963–1972 гг.). Было отмечено вековое уменьшение интенсивности радиоизлучения на частоте $f = 13$ МГц ($0,4 \pm 0,65$)% в год. В работе [17] получен спектр источника Кассиопея А в диапазоне от 5,8 до 25 МГц (измерения интенсивности проводились на 5 частотах, в том числе и с помощью интерферометра). В этой работе показано, что на частотах ниже 20 МГц спектральный индекс источника становится положительным.

4. Измерения на спутниках серии Электрон.

Расширение диапазона радиоастрономических измерений в сторону средних и длинных волн (низких частот) привело к необходимости проводить измерения на искусственных спутниках Земли (ИСЗ), где влияние ионосферного поглощения практически можно не учитывать. В 1964 г. группой ученых НИРФИ были проведены измерения на спутниках Электрон-2 и Электрон-4. На спутниках была установлена аппаратура для приема космического радиоизлучения в диапазоне частот 0,725–2,3 МГц. Инициаторами исследований были Г.Г. Гетманцев, Е. А. Бенедиктов, Н. А. Митяков и В. О. Рапопорт, а аппаратуру создавали Ю. А. Сазонов и А. Ф. Тарасов.

Проведение измерений в течение длительного времени позволило впервые обнаружить спорадическое излучение земной атмосферы на частотах 0,725 и 1,525 МГц. [18-20].

5. Исследование ионосферы методом частичных отражений

Метод частичных отражений (МЧО) – это радиолокационный метод исследования *D*-области ионосферы (высоты 50–90 км). Он основан на зондировании нижней ионосферы радиоимпульсами и приеме сигналов, рассеянных на естественных неоднородностях ионосферной плазмы. По характеристикам этих сигналов можно получать высотный профиль электронной концентрации, скорости движений и параметры неоднородностей. Метод возник в 50-х годах 20-го столетия на австралийском континенте [21]. Свое развитие он получил в Канаде во второй половине 60-х годов. По инициативе Е.А. Бенедиктова метод частичных отражений начали осваивать в НИРФИ. К концу 1969 г. на территории загородной лаборатории Зименки был создан мощный импульсный передатчик на частоте 5,75 МГц и четырехдипольная передающая антенна. Приемная антенна представляла собой синфазную решетку, имеющую 36 элементов (диполей) на каждой из двух взаимно перпендикулярных линейных поляризацій. Приемная аппаратура имела приемники Р-250, модернизированные для приема импульсных сигналов с полосой пропускания, расширенной до 40 кГц, и позволяла выделять две круговые поляризации. Принятые сигналы регистрировались на киноплёнку. Первые эксперименты на установке показали возможность измерения профилей электронной концентрации в период внезапных ионосферных возмущений (вспышек на Солнце), а также необходимость применения более низкой частоты для уверенных измерений в спокойных условиях.

В 70-х годах продолжалась модернизация установки 5,75 МГц и создавалась вторая очередь измерительного комплекса частичных отражений – оборудование на частоту 3 МГц. Приемная антенна на частоту 5,75 МГц была переделана в приемопередающую, и число элементов ее увеличено до 48. Создана приемопередающая антенна