

# ВАРИАЦИИ УРОВНЯ СИГНАЛА СДВ-ДВ РАДИОСТАНЦИЙ НА СРЕДНЕШИРОТНЫХ ТРАССАХ В УСЛОВИЯХ МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

*А.А. Егошин, В.А. Ермак, А.Н. Ляхов, Ю.В. Поклад*

Представлены статистические характеристики уровня радиосигналов СДВ-ДВ радиостанций, зарегистрированные в геофизической обсерватории (ГФО) ИДГ РАН «Михнево» в период X.2007–IV.2009 гг. в условиях абсолютного минимума солнечной активности. Для анализа были выбраны радиостанции Le Blanc (Франция, 18,3 кГц), GBZ (Великобритания, 19,6 кГц), HBG (Швейцария, 75 кГц), DCF-77 (Германия, 77,5 кГц), RBU (Россия, 66,6 кГц). Величина сигнала определяется динамикой процессов в нижней ионосфере. В амплитудах исследуемых сигналов наблюдается суточный и сезонный ход, а также долговременный тренд. Несмотря на отсутствие внешних возмущений ионосферы в отдельные дни наблюдаются интенсивные вариации уровня сигнала продолжительностью 2-3 часа, с перепадом амплитуды от 5 до 20 дБ в зависимости от частоты.

## Введение

Анализ распространения радиоволн в СДВ (3–30 кГц) и ДВ диапазоне (30–300 кГц) дает уникальные возможности по мониторингу процессов в нижней ионосфере. Распространение радиоволн этих частот идет в волноводе Земля-ионосфера, в дневных условиях с отражением от D-слоя ионосферы и в ночных с отражением от нижней части E-слоя в диапазоне высот 70–90 км. Вариации проводимости ионосферы в этом диапазоне высот проявляются в виде изменения величины принятого сигнала. Эти вариации в данном диапазоне высот невозможно фиксировать с помощью классического ионосферного зондирования из-за малости электронной концентрации и высокой частоты соударений электронов с нейтрами. Таким образом, продолжительный мониторинг СДВ-ДВ сигналов дает уникальную и единственную возможность анализа свойств нижней ионосферы и верификации существующих теоретических моделей распространения радиоволн.

Такие системы существуют за рубежом – сеть Стэнфордского университета, расположенная на Аляске, в Антарктиде и в континентальной части США [Poulsen, 1991; Cohen, Inan, Paschal, 2010], давно работающие пункты наблюдений в Индии [Kumar, 2009; Singh, Veenadhari, Cohen, et al., 2010]. В нашей стране мониторинг СДВ сигналов осуществлялся обсерваториями ПГИ КНЦ РАН в высоких широтах. Николаевской Астрономической обсерваторией (Украина) проводился и продолжает вестись мониторинг ДВ радиостанции DCF77 (Германия, частота 77,5 кГц) ([http://www.mao.nikolaev.ua/rus/ion\\_r.html](http://www.mao.nikolaev.ua/rus/ion_r.html)). В настоящее время ведется мониторинг СДВ сигналов радионавигационной системы «Альфа» на частотах 11,9, 12,6 и 14,9 кГц обсерваторией «Горьковская» СПбГУ (<http://rns-alpha.niirf.spbu.ru/index.html>).

В вышеуказанных пунктах измерения проводятся на фиксированных частотах, в основном в СДВ диапазоне. С вводом в действие в ГФО «Михнево» пункта радиоизмерений появился единственный в европейской части России пункт мониторинга СДВ-ДВ диапазона частот, на котором к настоящему времени создан банк данных измерений, охватывающий период с октября 2007 года по настоящее время.

Измерения осуществляются в ГФО ИДГ РАН «Михнево» (54,94°N, 37,73°E) приемником-измерителем Rohde & Shwarz ESH-3 в режиме сканирования по частоте в диапазоне 10–300 кГц в полосе частот 200 Гц на вертикальную антенну высотой 35 метров. Динамический диапазон приемника –20÷137 дБмкВ. Время полного сканирования составляет 2 мин 30 с. С учетом затрат времени на запись информации средний интервал между измерениями на одной частоте в течение суток составил порядка 4 минут. В отдельные периоды наблюдений диапазон сканируемых частот сокращался, что уменьшало время между последовательными наблюдениями вдвое.

Для анализа нами были выбраны станции, расположенные в Западной Европе, и работающие как в СДВ, так и в ДВ диапазоне (таблица).

Таблица

Перечень анализируемых радиостанций

| Радиостанция | Координаты       | Расстояние, км | Частота, кГц | Мощность, кВт |
|--------------|------------------|----------------|--------------|---------------|
| HWU          | 46,64°N 1,05°E   | 2702           | 18,3         | 200           |
| GBZ          | 52,72°N 3,06°W   | 2650           | 19,6         | 30            |
| RBU          | 55,73° N, 38,2°E | 93             | 66,6         | 10            |
| HBG          | 46,40°N, 6,26°E  | 2387           | 75           | 20            |
| DCF-77       | 50°N, 9°E        | 2006           | 77,5         | 50            |

Все трассы расположены в средних широтах, часть трассы от передатчика GBZ проходит над морской поверхностью (рис. 1). Согласно теоретическим моделям распространения радиоволн СДВ-ДВ диапазона для всех передатчиков, кроме RBU,

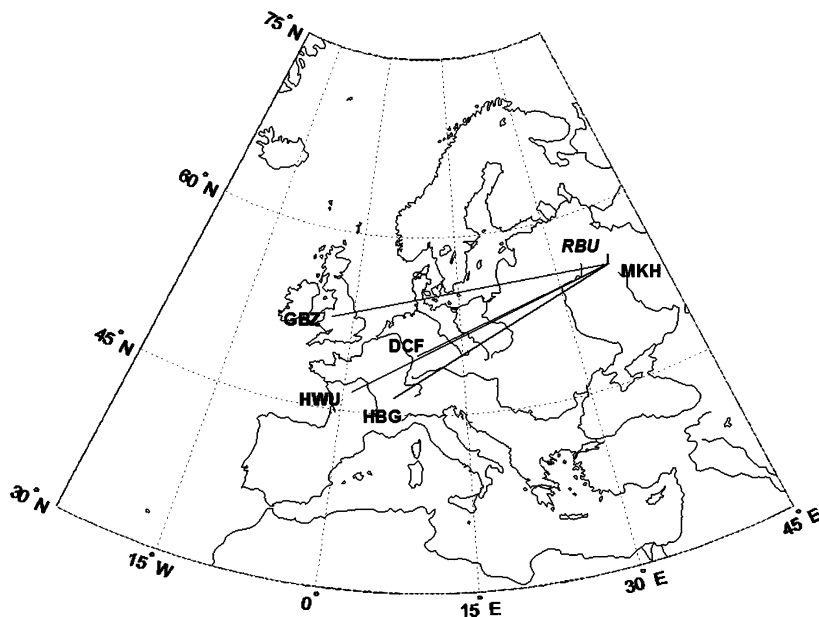


Рис. 1. Трассы распространения СДВ-ДВ сигналов

вариации уровня сигнала могут быть связаны с вариациями параметров ионосферы, а сигнал близкой радиостанции RBU должен слабо зависеть от состояния среды.

Для обработки был выбран период наблюдений с 1 октября 2007 по 30 апреля 2009 гг. Слежения велись круглосуточно, за исключением периодов переключения аппаратуры на наблюдения в режиме фиксации амплитуды на выбранной частоте, в соответствии с программой исследований. В июле–августе 2008 года наблюдения не велись из-за выхода аппаратуры из строя. Полная емкость банков данных составила ~100000 наблюдений на каждой частоте.

### **Условия наблюдений**

Период наблюдений пришелся на абсолютный минимум солнечной активности. В интервале с октября 2007 по апрель 2009 гг. по данным Мирового центра по геомагнетизму (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>) среднее значение  $A_p$  индекса равно  $6 \pm 5$ . Дней с  $A_p > 40$  (что соответствует магнитным бурям) не наблюдалось. Показатели солнечной активности находились на низком уровне, среднее значение индекса  $F10,7 = 69 \pm 4$ , максимальное равнялось 94. Было зафиксировано 14 рентгеновских вспышек С-класса, одна вспышка М-класса, вспышек Х-класса не было. В оптическом диапазоне были: 31 вспышка 1 класса, 4 вспышки – 2-го, 3 вспышки – 3-го и 0–4-го класса.

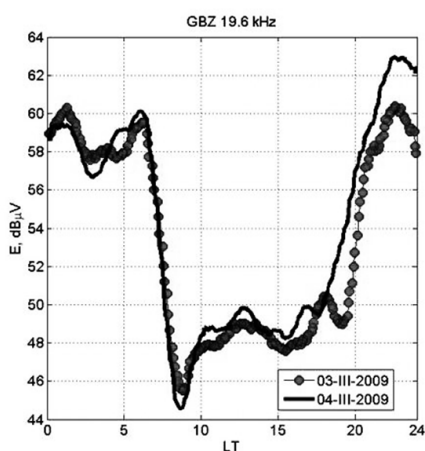
Таким образом, естественных возмущений, связанных с солнечной активностью, в анализируемый период не было. Это означает, что вариации уровня сигналов должны были бы отражать только суточный и сезонный ход, связанный с изменением освещенности радиотрасс. Необходимо отметить, что ошибки расчетов амплитуд сигналов на СДВ-ДВ трассах обычно приписывают плохому заданию параметров среды на высотах D и E-слоя из-за малой изученности процессов в ионосфере при возмущениях солнечной и магнитной активности, которые не удается адекватно ввести в модели распространения радиоволн. Приведенный в данной статье анализ данных наблюдений позволяет оценить, насколько изменчивы условия прохождения СДВ-ДВ волн в рассматриваемый период в спокойных условиях, и насколько «спокойными» являются эти условия.

### **Суточные вариации сигналов**

Классическая картина распространения СДВ-ДВ сигналов предполагает высокий уровень сигнала в ночные часы, его спад с восходом солнца и рост после заката. На длинных трассах (несколько тысяч км) могут наблюдаться дополнительные (до трех) локальные всплески амплитуды сигнала в утренние и вечерние часы [Kumar, 2009], вызванные появлением дополнительных интерференционных минимумов по трассе распространения радиоволны. В ночные часы высота отражения радиоволны смещается к E-области ионосферы, где частота соударений электронов с нейтралами ниже в силу меньшей плотности атмосферы. Это ведет к росту коэффициента отражения и уменьшению поглощения. В дневные часы граница отражения расположена на высотах с большей плотностью нейтральной атмосферы, где частота соударения электронов с нейтралами выше и выше поглощение поля волны.

Наблюдения в ГФО «Михнево» в спокойных условиях показали, что амплитуды сигналов в течение суток, и день ото дня, могут меняться в достаточно широ-

ких пределах. Для примера на рис. 2а приведены измерения для передатчиков GBZ (слева) и RBU (справа) 3 и 4 марта 2009 года. Для СДВ передатчика (GBZ) суточный ход совпадает с классическим, но поведение амплитуды в ночные и вечерние часы различается. ДВ сигнал (RBU) 3 марта фиксирует последовательность затухающих колебаний с ~3-х часовым периодом, минимум достигается в районе 20 часов местного времени. Расхождение с записью 4 марта наблюдается в течение всех суток, за исключением короткого промежутка с 15 до 18 часов. На рис. 2б для тех же дней приведены записи сигнала ДВ передатчиков DCF (слева) и HBG(справа). Суточные хода близки для передатчика HBG, за исключением 10 часов утра, и полностью различаются для DCF, для которого наблюдается четкий утренний максимум амплитуды. Всего в анализируемый период аномалии для ДВ передатчика DCF наблюдались в 13,6% дней, для ДВ передатчика HBG в 22,8% дней.



а

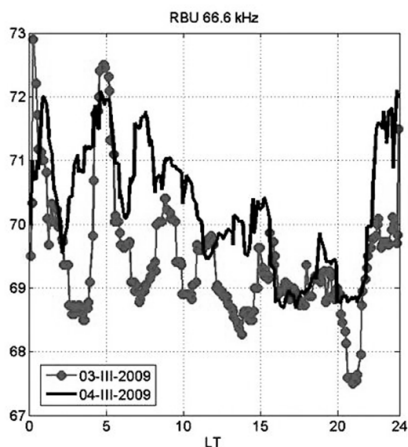
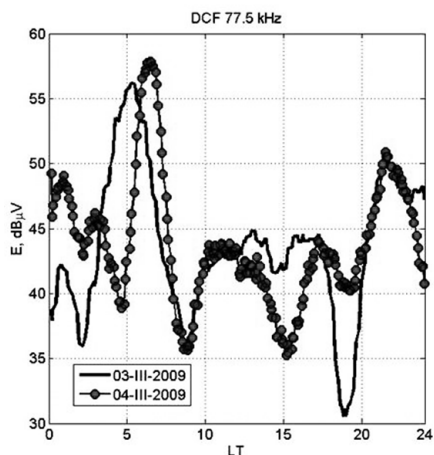


Рис. 2а. Суточный ход амплитуды сигнала GBZ и RBU 3 и 4 марта 2009 г.



б

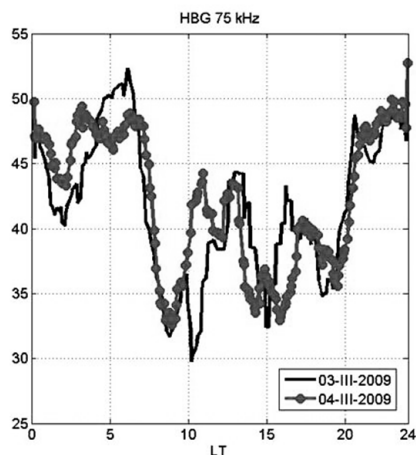


Рис. 2б. Суточный ход амплитуды сигнала DCF и HBG 3 и 4 марта 2009 г.

Анализ суточных вариаций сигналов радиостанций СДВ-ДВ диапазона показал, что, во-первых, в отсутствие внешних естественных возмущений временной ход сигнала может резко меняться день ото дня; во-вторых, сигнал близкой ДВ радиостанции RBU испытывает заметные вариации; в-третьих, канонический суточный ход в некоторые периоды времени полностью разрушается и демонстрирует динамику характерную для прохождения терминатора.

### Долговременные и сезонные вариации амплитуды сигналов

Статистический анализ вариаций суточного хода показал сильное расхождение между сезонными изменениями амплитуды сигнала СДВ передатчиков (GBZ и HWU) и ДВ передатчиков (RBU, HBG, DCF) (рис. 3). Минимальные амплитуды на ДВ трассах наблюдаются в мае–июне, а на СДВ трассах – в августе. Для СДВ трасс наблюдался локальный максимум в октябре, который отсутствовал на ДВ трассах (RBU и DCF) и был зафиксирован для ДВ трассы (HBG).

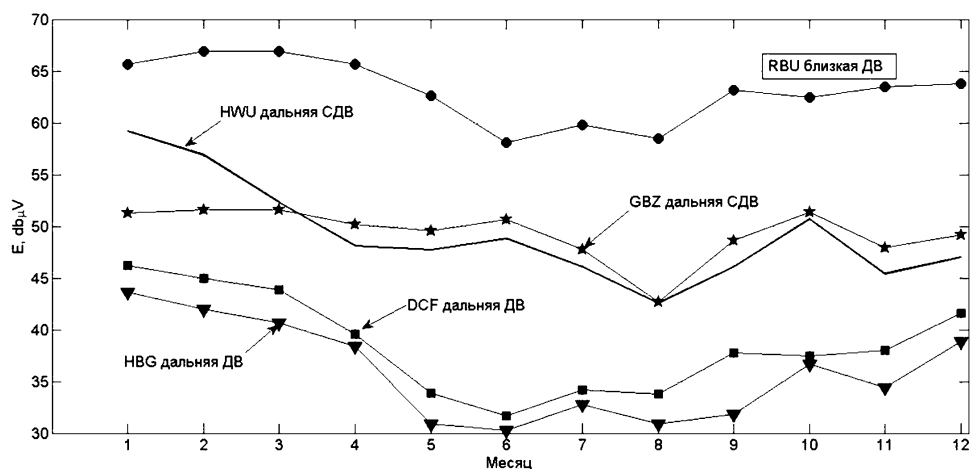


Рис. 3. Сезонное изменение среднесуточной амплитуды сигнала СДВ-ДВ радиостанций

Показателен тот факт, что сигнал близкой ДВ станции (RBU) имеет ярко выраженный сезонный ход, с максимумом в феврале–марте, а не в январе–декабре, как для дальних ДВ передатчиков HBG и DCF.

На рис. 4 представлены временные записи напряженности электрического поля сигналов выбранных радиостанций за весь период наблюдений. При практически одинаковом расстоянии от передатчиков HWU и GBZ (рис. 4 верх) до пункта приема амплитуда сигнала передатчика GBZ на 10 дБ ниже в зимние месяцы 2007–2008 гг. В весенние, летние и осенние месяцы амплитуды сигналов были очень близки. К общим характеристикам приема следует отнести повышение амплитуды сигналов в зимние месяцы.

Амплитуды сигналов радиостанций HBG и DCF (рис. 4 нижний) демонстрируют сходную динамику. Максимальные амплитуды наблюдаются в зимние месяцы, минимальные – в мае.

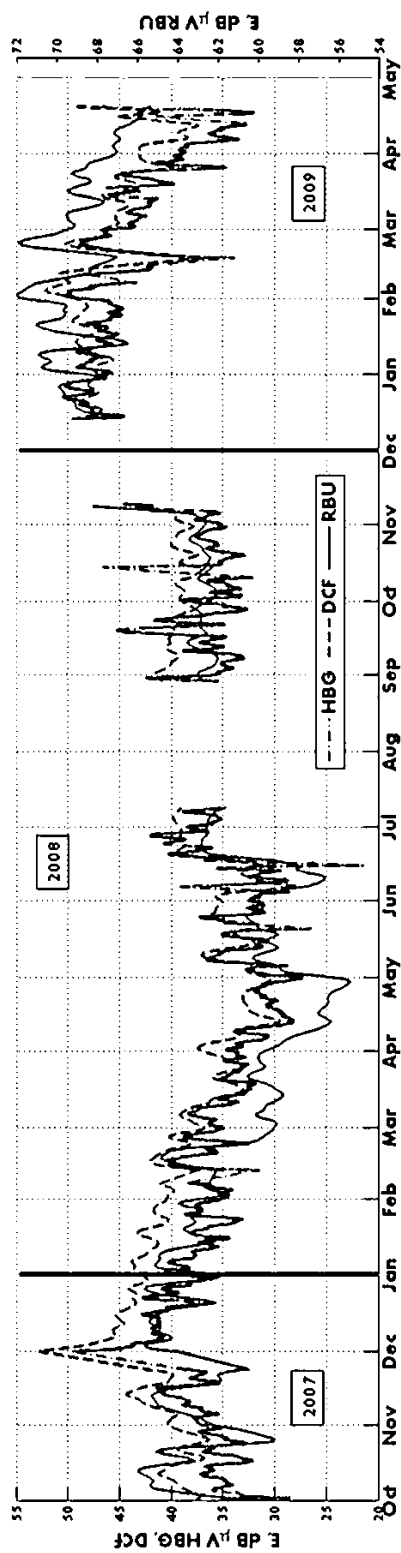
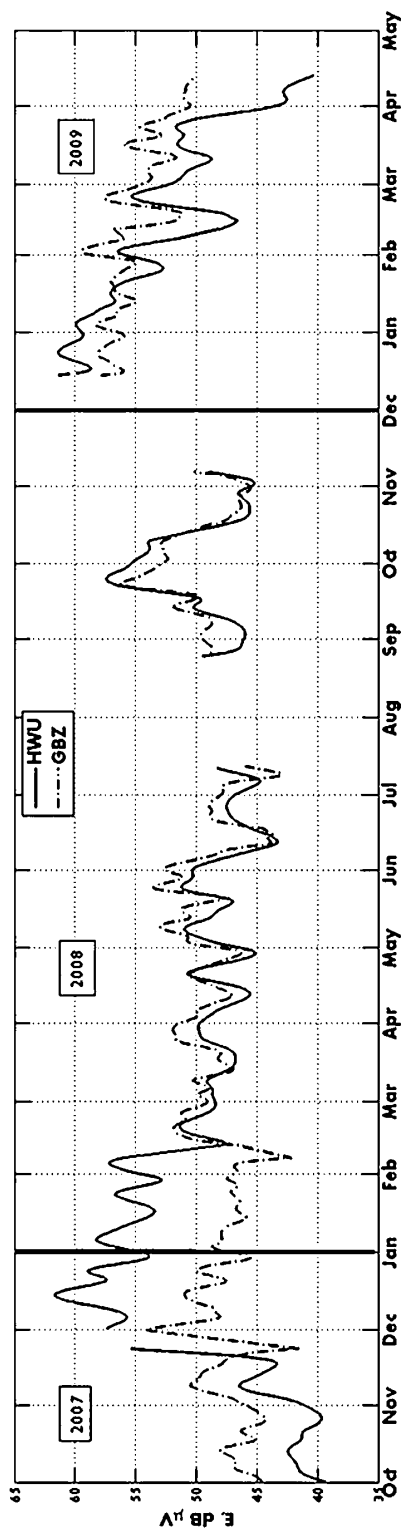


Рис. 4. Вариации уровня сигналов радиостанций за весь период времени

Особый интерес представляет временная динамика сигнала ДВ радиостанции RBU (рис. 4 – нижний). Видно, что качественно она воспроизводит ход ДВ радиостанций HBG и DCF, перепад величины сигнала в анализируемый период составил ~20 дБ. Согласно современным теоретическим моделям распространения ДВ радиоволн параметры ионосферы не оказывают влияния на уровень сигнала на таких расстояниях. Отметим особо тот факт, что в вычислительных моделях распространения СДВ-ДВ радиоволн (таких как MODESEARCH [Morfitt, Shellman, 1976] и LWPC v 2.1 [Ferguson, and Snyder, 1987], модель ИДГ РАН PARABEQ, конечно-разностные модели FDTD [Berenger, 2002]) поле излучателя вводится в расчетную область на расстоянии порядка 120–200 км от излучателя, и все эффекты среды начинают «работать» только на больших расстояниях.

Таким образом, имеющиеся наблюдательные данные по вариациям сигнала близкой ДВ радиостанции RBU ставят вопрос о погрешности современных теоретических представлений.

### **Заключение**

Приведенные в статье результаты мониторинга европейских СДВ-ДВ радиостанций, выполненного в условиях абсолютного минимума солнечной и отсутствия геомагнитной активности показали, что амплитуда сигналов в ДВ диапазоне подвержена короткопериодной (2–3 часа) изменчивости, с перепадом амплитуд до 20 дБ. Долговременная динамика сигналов СДВ и ДВ диапазона практически совпадает. Обнаружено, что сигнал близкой ДВ радиостанции ведет себя аналогично сигналам дальних радиостанций, хотя и с меньшим внутрисуточным перепадом амплитуд (до 5 дБ), с годовым разбросом амплитуд до 20 дБ. Этот факт не может быть описан существующими теоретическими моделями распространения ДВ радиоволн. Наблюдаемые значительные вариации сигналов в условиях отсутствия возмущений солнечной и геомагнитной природы доказывают существование в нижней ионосфере физических процессов, не учитываемых современными моделями среды и распространения радиоволн. С нашей точки зрения наиболее вероятно влияние глобальных волновых процессов в нейтральной атмосфере.

Особое место в полученных результатах принадлежит обнаруженным вариациям сигнала близкой ДВ станции RBU. Теоретически, трасса, проходящая над Москвой, не может ничего «знать» о состоянии ионосферы над Западной Европой. Синхронность вариаций RBU и европейских передатчиков может означать, что основной вклад в уровень принятого сигнала обеспечивается состоянием среды над пунктом приема, а не по трассе, что плохо согласуется с доминирующим в современной теории модовым подходом к распространению радиоволн СДВ-ДВ диапазона в волноводе Земля-ионосфера.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение вариаций уровней сигналов реперных радиостанций на фазе роста солнечной активности и численное моделирование наблюдаемых эффектов.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. профессору Ю.И. Зецеру за помощь в подготовке статьи.

### **Литература**

*Poulsen W.L.* Modeling of very low frequency wave propagation and scattering within the earth ionosphere waveguide in the presence of lower ionospheric disturbances, Ph.D. Thesis, Stanford Univ., Stanford, Calif., 1991.

*Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W.* Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument, IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing, Vol 48, Issue 1, Pages 3–17, doi:10.1109/TGRS.2009.2028334, 2010.

*Kumar S.* Waveguide parameters of 19.8 kHz signal propagating over a long path, Research Letters in Physics, doi:10.1155/2009/216373, 2009.

*Singh R., Veenadhari B., Cohen M.B., et al.* Initial results from AWESOME VLF receivers set up in low latitude Indian regions under IHY2007/UNBSSI program, Current Science, Vol. 98, NO. 3, 10 FEBRUARY 2010, p. 398–405.

*Budden K.G.* Radio waves in the ionosphere, Cambridge, University Press, 1961.

*Morfit D.G., Shellman C.H.* ‘MODESRCH’, An Improved Computer Program for Obtaining ELF/VLF/LF Mode Constants in an Earth-Ionosphere Waveguide. PROPAGATION TECHNOLOGY DIVISION, NAVAL ELECTRONICS LABORATORY CENTER SAN DIEGO, CALIFORNIA 92152, Interim report 771. 1976.

*Ferguson It. L., and Snyder F.P.* The segmented waveguide program for long wavelength propagation calculations, Tech. Doe. 1071, Naval Ocean Systems Center, San Diego, Calif., 1987.

*Berenger J.P.* FDTD computation of vlf-lf propagation in the Earth-ionosphere waveguide, Annals of Telecommunications, Vol. 57, Numbers 11–12 2002, p. 1059–1090.