

УДК 528+551.5

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДНЕВНОЙ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ЗАТМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ТРАССАХ СПУТНИК–СПУТНИК

О. И. Яковлев\*, С. С. Матюгов, А. А. Павельев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
г. Фрязино, Россия

Анализируются особенности определений и возможности изучения радиозатменным методом высотных профилей электронной концентрации и характеристик спорадических образований дневной полярной ионосферы Арктики на широтах более  $67^\circ$  в период с 19 июня по 1 июля 2015 года. По данным сеансов затменного зондирования ионосферы на межспутниковых трассах GPS–FormoSat приведены результаты измерений электронной концентрации на высотах  $90\div 650$  км, даны её зависимости от условий освещённости Солнцем на высоте 100 км и представлены материалы о спорадических образованиях  $E_s$  на высотах  $80\div 120$  км. Обсуждаются два типа структур  $E_s$ , обусловленных ветровым сдвигом и высыпаниями энергичных частиц из магнитосферы.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования изменчивой ионосферы на высоких широтах затруднительны из-за сложности обеспечения регулярной работы станций высотно-частотного радиозондирования. В результате многолетней работы таких станций был получен большой объём данных о зависимостях электронной концентрации от высоты  $N(h, t)$  при разных условиях освещённости для нижней ионосферы и области  $E$ , где на высотах  $h = 80\div 120$  км нерегулярно появляются спорадические образования, и для области  $F$ , где в летнее время на высоте  $h \approx 280$  км наблюдается главный максимум электронной концентрации. Убедительное доказательство быстрой изменчивости профилей  $N(h, t)$  на высоких широтах было получено с использованием геофизических ракет. Оно основано на том, что при подъёме и спуске ракеты получались различные зависимости  $N(h)$ . Дополнительная важная информация о структуре ионосферы была получена по данным действующих в высоких широтах мощных установок некогерентного рассеяния радиоволн. Особо информативна регулярно работающая в Соданкюля ( $67,4^\circ$  с. ш.,  $26,6^\circ$  в. д.) ионосферная станция высотно-частотного зондирования. Подробные результаты исследований ионосферы высоких широт, осуществлённых наземными радиосредствами, описаны в книгах [1, 2].

Следующий этап изучения полярной ионосферы связан с применением спутников, когда были развиты и использовались три метода определения характеристик плазмы. Первый метод основан на высотно-частотном зондировании со спутника с орбитой выше области главного максимума области  $F$ , когда получают зависимости  $N(h)$  верхней ионосферы. Во втором метод используются расположенные на спутнике приборы, которые осуществляют непосредственные измерения параметров ионосферной плазмы на орбите, т. е. дают горизонтальный разрез распределения параметров ионосферы при незначительном изменении высоты. В третьем методе применяются трассы навигационные спутники GPS–наземные приёмные пункты. В новом методе затменного радиопросвечивания используются радиотрассы спутник–спутник, что позволяет осуществлять почти вертикальное сечение всей толщи ионосферы. Спутниковые методы существенно расширяют возможности изучения процессов, обуславливающих сильную изменчивость полярной ионосферы.

\* oiy117@ire216.msk.su

В методе затменного радиопросвечивания используются изменения фазы и амплитуды дециметровых радиоволн при заходе спутника–приёмника сигналов за лимб Земли относительно спутника–передатчика, когда лучевая линия осуществляет сечение ионосферы. По этим данным восстанавливается высотный профиль электронной концентрации, определяются параметры слоистых спорадических образований и мелкомасштабной неоднородности плазмы. На первом этапе развития этого метода разрабатывались алгоритмы определений указанных характеристик среднеширотной и экваториальной ионосферы, оценивалась точность получаемых параметров и осуществлялась проверка результатов радиозатменного способа исследования [3–7]. Результатом этого этапа исследований явилось доказательство эффективности радиозатменного метода глобального мониторинга и создание опытной системы, позволяющей осуществлять в различных районах Земли около 2000 радиопросвечиваний ионосферы каждые сутки. Это способствовало проведению исследований высотного профиля электронной концентрации и спорадических образований — слоёв  $E_s$  — в экваториальных районах и в средних широтах. Сначала по упрощённой методике были получены карты глобального распределения интенсивных слоёв  $E_s$  [8–12]. Затем были разработаны методы определений параметров слоёв  $E_s$ : их верхней и нижней границ, толщин, интенсивностей и частоты их появления днём и ночью [13–17].

В работах [18–21] описаны результаты исследований ночной полярной ионосферы Арктики, полученные этим методом в период с 26 октября по 9 ноября 2003 года во время сильной солнечной вспышки. В этих публикациях показано, что в ночной период удаётся проследить эволюцию нижней ионосферы под действием ударной волны солнечного ветра.

По данным [22] в период с 21 по 28 июня 2015 года наблюдалась серия интенсивных корональных выбросов, приведших к изменениям дневной полярной ионосферы. Для получения сведений об этих изменениях нами использовались результаты 684 затменных зондирований ионосферы на широтах более  $67^\circ$ , осуществлённых в период с 19 июня по 1 июля 2015 года. Отметим, что в рассматриваемый период в полярных районах в сутки удавалось проводить не более 60 радиопросвечиваний ионосферы. Сначала необходимо было определить состояние ионосферы в спокойные дни, под которыми будем подразумевать дни без сильных геомагнитных возмущений и явно выраженного наличия интенсивных спорадических слоёв  $E_s$ . Для этого использованы экспериментальные данные, полученные 19, 20 и 27 июня 2015 года, когда значение планетарного геомагнитного индекса  $K_p$  не превышало 2. За эти три дня было осуществлено 156 затменных зондирований полярной ионосферы. В период с 21 по 26 июня наблюдались частые, особо сильные проявления спорадических образований, зарегистрированных в 105 сеансах радиопросвечивания. В эти дни геомагнитный индекс  $K_p$  изменялся в пределах от 4 до 8.

Целью статьи является анализ возможностей и результатов затменного радиопросвечивания дневной полярной ионосферы Арктики на широтах более  $67^\circ$ . Ставилась задача получить сведения о высотном профиле электронной концентрации всей толщи ионосферы на высотах  $90 \div 650$  км при разных условиях её освещённости и об особенностях проявления спорадических образований нижней ионосферы. При изложении экспериментального материала подробности методологии радиозатменного зондирования ионосферы опускаются, т. к. соответствующие сведения приведены и детально обсуждаются в пяти книгах [23–27].

## 1. ОСОБЕННОСТИ РАДИОЗАТМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Исследования ионосферы были проведены с использованием радиозатменной системы, включающей навигационные спутники GPS — излучатели радиоволн — и малые исследовательские спутники FormoSat-3 — приёмники сигналов. Высота орбиты спутников GPS равна 20 180 км, а спутники FormoSat-3 движутся по почти круговым орбитам с высотой около 800 км. Для зон-

дирования используются высокостабильные когерентные сигналы с двумя несущими частотами  $f_1 = 1\,575,42$  МГц и  $f_2 = 1\,227,6$  МГц. При заходе аппарата FormoSat-3 за лимб Земли относительно спутника GPS лучевая линия спутник–спутник осуществляет разрез всей толщи ионосферы ниже высоты орбиты спутника FormoSat-3. Проводились измерения группового запаздывания сигналов с частотой отсчётов 1 Гц при  $h > 130$  км и измерения амплитуды и приращения фазового пути сигналов в двух диапазонах с частотой отсчётов 50 Гц при высоте зондируемой области  $h \leq 120 \div 130$  км.

По результатам измерений разности запаздывания частотных сигналов диапазонов  $f_2$  и  $f_1$  определяется интегральная электронная концентрация на лучевой линии и её изменение в зависимости от времени  $J(t)$ . Высокоточные данные об орбитах спутников позволяют найти зависимости от времени  $t$  минимальной высоты лучевой линии радиоволн  $h(t)$  и координаты её перигея, т. е. зондируемой области ионосферы. В результате для каждого сеанса измерений создаётся массив экспериментальных данных о зависимости интегральной электронной концентрации на трассе спутник–спутник от минимальной высоты лучевой линии  $J(h)$ . Далее делается допущение, что пространственное распределение электронной концентрации в области радиопросвечивания обладает хотя бы приближённой локальной сферической симметрией. Это существенное предположение позволяет с помощью интегрального преобразования Абеля по экспериментальной функции  $J(h)$  найти зависимость электронной концентрации от высоты  $N(h)$ . Полярная ионосфера изменчива и не обладает сферической симметрией, поэтому переход от  $J(h)$  к определению  $N(h)$  с помощью преобразования Абеля может сопровождаться появлением трудно контролируемых ошибок. Такая процедура измерений и обработки их результатов обеспечивает получение данных о состоянии ионосферы при  $h > 100$  км. Оцениваемая ошибка определения электронной концентрации при этом составляет около  $\pm 10^4$  см<sup>-3</sup>.

Получение дополнительных данных о тонкой структуре нижней ионосферы возможно в режиме измерений амплитуды и фазы сигналов с высокой частотой отсчётов. Переход в такой режим измерений происходит при высоте перигея лучевой линии, равной  $115 \div 130$  км. Данные, полученные в таком режиме зондирования, используются для определения характеристик спорадических образований в высотном интервале  $80 \div 120$  км, поиска их связи с изменениями геомагнитной обстановки и процессами в нейтральной атмосфере [17, 30]. В публикациях [26, 27] показано, что при наличии в ионосфере слоёв  $E_s$  чётко проявляются характерные вариации амплитуды сигналов  $A(h)$ , зависящие в основном от вертикального градиента электронной концентрации в нижней ионосфере.

Условно мы будем выделять три высотные области ионосферы: нижнюю ( $h \approx 80 \div 200$  км, включает в себя слой  $E$  и малые высоты), в которой наблюдается влияние полярных сияний и других изменчивых факторов; среднюю ( $h = 200 \div 350$  км, включает в себя слой  $F$  и главный ионосферный максимум) и верхнюю ( $h \approx 400 \div 700$  км). Ошибки определений профиля  $N(h)$  в этих высотных интервалах различны. Так, изменчивость высокой электронной концентрации в районе главного ионосферного максимума может приводить к ошибкам определений  $N(h)$  нижней ионосферы при  $h = 90 \div 110$  км.

Зондирование верхней ионосферы от 700 км и до максимума слоя  $F$  длится примерно 4 мин, от максимума ионизации до  $h = 140$  км — порядка 1 мин, а зондирование нижней ионосферы в интервале высот  $80 \div 140$  км в среднем осуществляется за 30 с. Во время измерений изменяются не только высота зондируемой области ионосферы, но и её географические координаты, т. е. условия освещённости Солнцем. Изменение координат по широте или долготе может достигать нескольких градусов, и, следовательно, пространственные изменения в верхней ионосфере могут влиять на результаты зондирования нижней ионосферы. Это обстоятельство также является особенностью затменного зондирования.

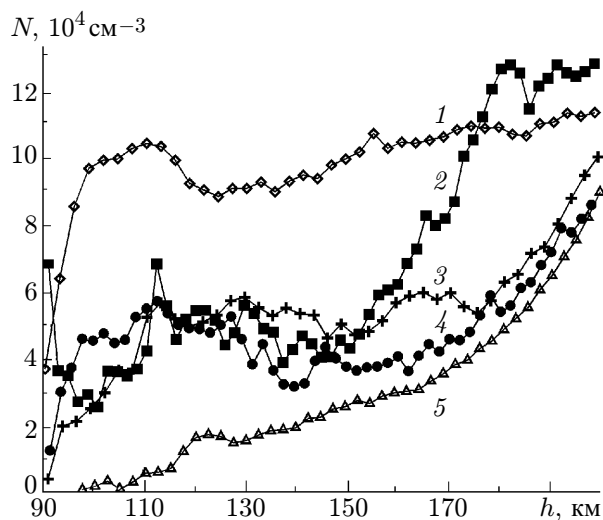


Рис. 1. Типичные зависимости  $N(h)$  в нижней ионосфере для сеансов первой группы 27.06.2015: сеанс 02:15 UT,  $73,1^\circ$  с. ш.,  $13,1^\circ$  з. д. (1); 15:42 UT,  $70,1^\circ$  с. ш.,  $159,5^\circ$  в. д. (2); 14:02 UT,  $68,4^\circ$  с. ш.,  $176,5^\circ$  в. д. (3); 00:35 UT,  $67,7^\circ$  с. ш.,  $23,8^\circ$  в. д. (4); 19:02 UT,  $66,8^\circ$  с. ш.,  $44,9^\circ$  в. д. (5)

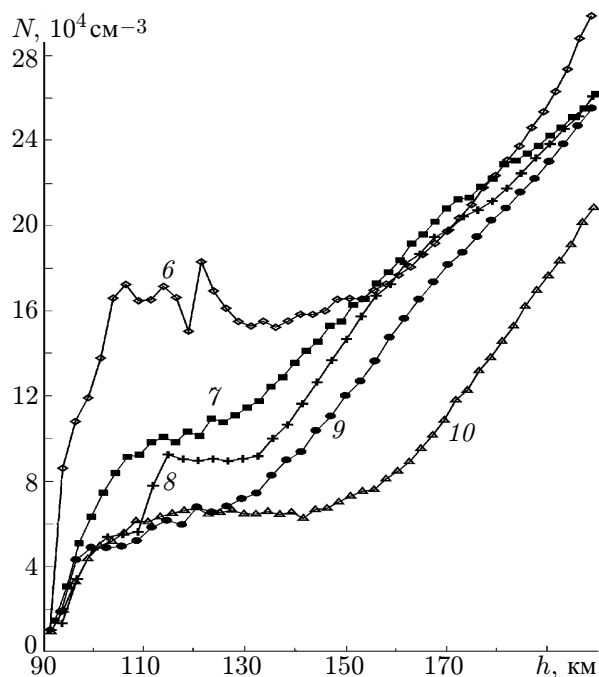


Рис. 2. Примеры зависимостей  $N(h)$  в E-области и нижней ионосфере для сеансов второй группы 22.06.2015: сеанс 22:16 UT,  $75,7^\circ$  с. ш.,  $12,9^\circ$  з. д. (6); 02:00 UT,  $68,2^\circ$  с. ш.,  $126,3^\circ$  з. д. (7); 00:20 UT,  $73,0^\circ$  с. ш.,  $96,5^\circ$  з. д. (8); 03:43 UT,  $76,7^\circ$  с. ш.,  $138,0^\circ$  з. д. (9); 18:56 UT,  $79,2^\circ$  с. ш.,  $117,8^\circ$  в. д. (10)

## 2. МОРФОЛОГИЯ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Для анализа состояния ионосферы в спокойные дни были выбраны сеансы измерений с характерными зависимостями  $N(h)$ , отличающимися значениями электронной концентрации. Из этого массива данных выделены две группы с относительно низкими и высокими значениями  $N$  на высоте ниже 200 км. Для сеансов зондирования, входящих в эти группы, были проведены расчёты угла  $\beta$  возвышения Солнца над горизонтом для участка лучевой линии спутник–спутник, находящегося на минимальной высоте над земной поверхностью. Ожидается, что в группу с низкой электронной концентрацией преимущественно вошли сеансы измерений, осуществлённые при низкой высоте Солнца. Это является убедительным свидетельством того, что при отсутствии геомагнитного возмущения и других внешних факторов определяющую роль в формировании профиля  $N(h)$  в дневной полярной ионосфере при  $h > 200$  км играют условия освещённости. В группу с относительно низкими значениями  $N$  вошли, в частности, сеансы зондирования, осуществлённые 27 июня, а в группу с высокими значениями  $N$  — сеансы 20 июня 2015 года.

Типичные зависимости  $N(h)$  для нижней ионосферы при относительно низких значениях электронной концентрации показаны на рис. 1. В подрисуночных подписях для каждого графика указаны день и время начала измерений, широта и долгота района зондирования. Для зависимостей, показанных кривыми 2, 3 и 4, характерна сильная изменчивость электронной концентрации

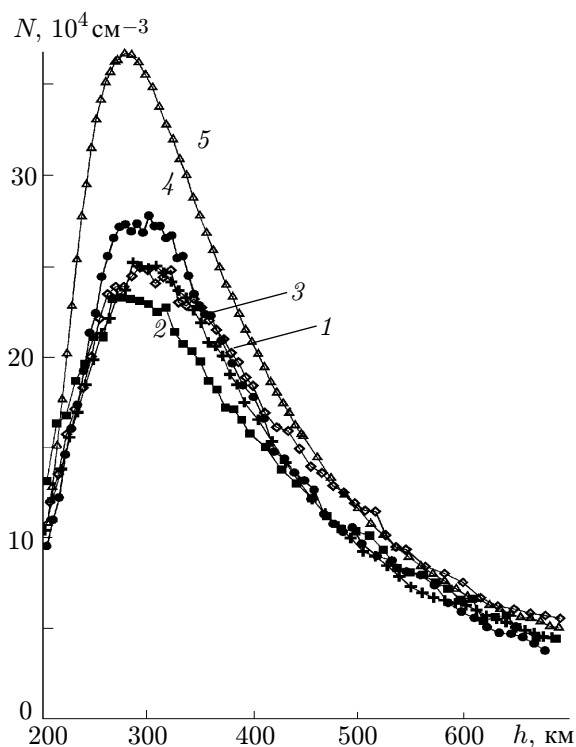


Рис. 3. Высотные профили электронной концентрации в  $F$ -области и верхней ионосфере для первой группы данных 27.06.2015: 02:15 UT,  $73,3^\circ$  с. ш.,  $19,6^\circ$  з. д. (1); 15:42 UT,  $72,9^\circ$  с. ш.,  $150,7^\circ$  в. д. (2); 14:02 UT,  $68,9^\circ$  с. ш.,  $170,7^\circ$  в. д. (3); 00:35 UT,  $69,7^\circ$  с. ш.,  $16,9^\circ$  в. д. (4); 19:02 UT,  $67,8^\circ$  с. ш.,  $43,0^\circ$  в. д. (5)

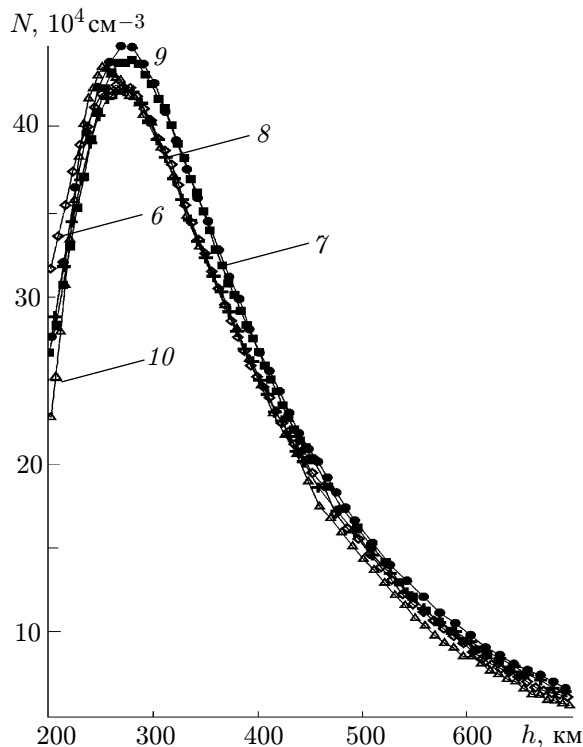


Рис. 4. Типичные зависимости  $N(h)$  в  $F$ -области и верхней ионосфере для второй группы данных: 22:16 UT,  $75,2^\circ$  с. ш.,  $17,0^\circ$  з. д. (6); 02:00 UT,  $66,5^\circ$  с. ш.,  $125,5^\circ$  з. д. (7); 00:20 UT,  $71,9^\circ$  с. ш.,  $94,0^\circ$  з. д. (8); 03:43 UT,  $75,5^\circ$  с. ш.,  $135,5^\circ$  з. д. (9); 18:56 UT,  $79,6^\circ$  с. ш.,  $104,5^\circ$  в. д. (10)

на высоте 95 км: от  $N = 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  до хаотических всплесков, достигающих  $N = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . В  $E$ -области регулярно регистрируется слабо выраженный максимум  $N(110 \div 120 \text{ км}) = (5 \pm 1) \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а для высот  $h = 130 \div 150 \text{ км}$  характерно  $N(h)$  со средним значением  $N = 4,5 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ . На высотах  $h = 160 \div 190 \text{ км}$  наблюдается быстрое увеличение электронной концентрации при возрастании  $h$ , среднее значение  $N(190 \text{ км}) = (10 \pm 2) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Графики 1 и 5 этого рисунка показывают пределы вариаций  $N(h)$ . При  $h = 110 \div 140 \text{ км}$  отклонения  $N$  от указанных средних значений велики; так, по графику 1, концентрация  $N(130 \text{ км}) = 9 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а по зависимости 5 имеем  $N(130 \text{ км}) = 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . При  $h = 190 \text{ км}$  электронная концентрация варьируется в меньших пределах: по зависимостям 1 и 5 она равна  $11 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  и  $9 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  соответственно.

Примеры зависимостей  $N(h)$  для нижней ионосферы при высоких значениях электронной концентрации показаны на рис. 2. Здесь также видна сильная изменчивость электронной концентрации при  $h = 95 \text{ км}$ . Графики 7, 8 и 9 этого рисунка свидетельствуют о хорошей повторяемости зависимостей  $N(h)$  в диапазоне  $h = 100 \div 190 \text{ км}$ . По данным этих графиков средние значения  $N(120 \div 140 \text{ км}) = (8 \pm 2) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а  $N(160 \text{ км}) = (17 \pm 1) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Обратим внимание на график 6, у которого при  $h = 105 \div 130 \text{ км}$  наблюдается сильное возрастание электронной концентрации с максимумом, характерным для спорадических образований. График 10 при  $h = 140 \div 190 \text{ км}$  даёт явно заниженные на  $7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  значения  $N$ . Резкое увеличение электронной концентрации при  $h = 90 \div 95 \text{ км}$  на графике 1 рис. 1 и графике 6 рис. 2 обусловлено влиянием сильных слоёв  $E_s$ .

На рис. 3 даны зависимости  $N(h)$  при низкой электронной концентрации для  $F$ -области ионосферы с явно выраженным главным максимумом при  $h = 290 \div 320$  км и почти экспоненциальным уменьшением  $N(h)$  в области высот  $h = 360 \div 650$  км. Видно, что концентрация  $N$  изменяется сильно: от минимальной  $N = 23 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  до максимальной  $N = 36 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ .

На рис. 4 представлены зависимости  $N(h)$  для верхней ионосферы при относительно больших значениях  $N$ . Видно, что в пяти сеансах радиозондирования высотные профили  $N(h)$  отличаются незначительно, электронная концентрация в главном ионосферном максимуме  $N = (46 \pm 2) \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Показанные на рис. 3 и 4 зависимости  $N(h)$  при  $h = 400 \div 650$  км хорошо соответствуют аппроксимации

$$N(h) = N(400 \text{ км}) \exp[-\alpha (h[\text{км}] - 400)].$$

По данным рис. 3 среднее значение  $N(400 \text{ км}) = 18 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ,  $\alpha = 4,72 \cdot 10 \text{ км}^{-1}$ , а по материалам рис. 4 имеем  $N(400 \text{ км}) = 26 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ,  $\alpha = 5,14 \times 10 \text{ км}^{-1}$ .

Для оценки роли освещённости в ионизации атмосферы мы рассмотрели зависимость электронной концентрации на высоте 100 км от угла  $\beta$ , определяющего высоту Солнца над горизонтом. Эта зависимость по данным 46 зондирований ионосферы показана на рис. 5 линией регрессии. Из него следует, что при  $\beta \approx 5^\circ$  электронная концентрация на высоте 100 км в среднем равна примерно  $(2,5 \pm 2) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , что близко к пределу достоверности её определения на этой высоте. При  $\beta = 20^\circ \div 25^\circ$  роль освещённости проявляется достаточно надёжно; при таких углах  $\beta$  в среднем  $N(100 \text{ км}) = (7,5 \pm 4) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Для больших углов  $\beta$  наблюдается существенный разброс значений электронной концентрации: так, при  $\beta = 40^\circ \div 50^\circ$  среднее значение  $N(100 \text{ км})$  составляет  $(40 \pm 12) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Аналогичный анализ роли освещённости в ионизации атмосферы был проведён для зондирования ионосферы на высоте 300 км. Установлено, что при  $\beta = 3^\circ \div 7^\circ$  среднее значение  $N(300 \text{ км}) = (26 \pm 6) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ; для  $\beta = 20^\circ \div 25^\circ$  получено  $N(300 \text{ км}) = (36 \pm 10) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а для  $\beta > 30^\circ$  наблюдается очень большой разброс значений  $N(300 \text{ км})$ . При малых углах  $\beta$  всегда имеет место относительно низкая электронная концентрация  $N(300 \text{ км})$ , а при больших значениях этого угла выявить зависимость  $N(\beta)$  не удаётся.

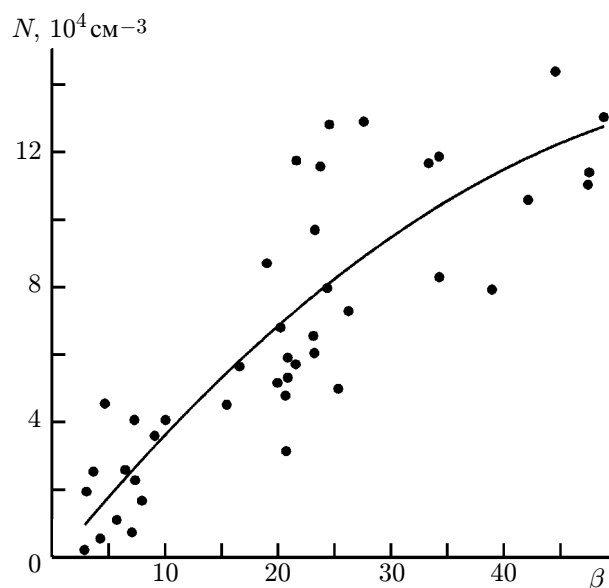


Рис. 5. Зависимость электронной концентрации на высоте 100 км от освещённости Солнцем

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СПОРАДИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АМПЛИТУДЫ СИГНАЛОВ

Амплитуды сигналов для сложного тракта GPS—FormoSat в разных сеансах радиопросвечивания отличаются. Для устранения их различий проводилась её нормировка к значению, равному единице. За 13 суток регистрации сигналов было получено 684 зависимостей  $A(h)$ , отличающихся появлениями структур  $E_s$  с разными интенсивностями или их отсутствием. В настоящее время нет устоявшейся классификации типов спорадических образований из-за многообразия их проявления как в результатах измерений амплитуды и фазы зондирующего сигнала, так и при анализе

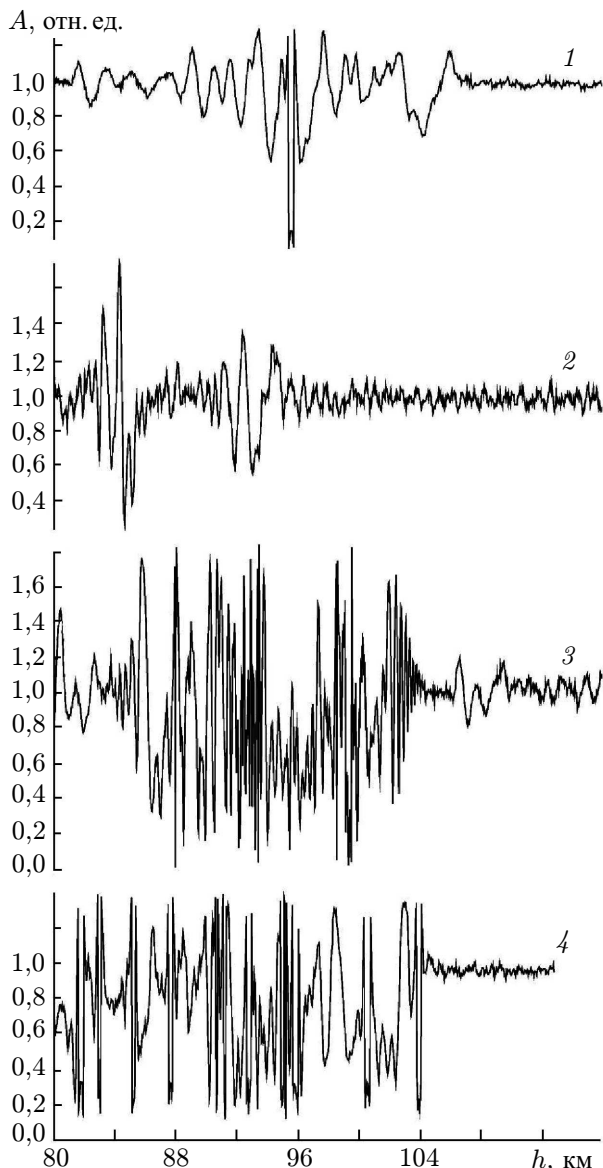


Рис. 6. Примеры зависимостей  $A(h)$  для  $E_s$ -структур первого типа: 21:18 UT 21.06.2015,  $67,1^\circ$  с. ш.,  $100,3^\circ$  в. д. (1); 20:43 UT 22.06.2015,  $69,4^\circ$  с. ш.,  $135,4^\circ$  з. д. (2); 14:17 UT 25.06.2015,  $68,9^\circ$  с. ш.,  $107,9^\circ$  в. д. (3); 05:06 UT 23.06.2015,  $70,7^\circ$  с. ш.,  $55,6^\circ$  в. д. (4)

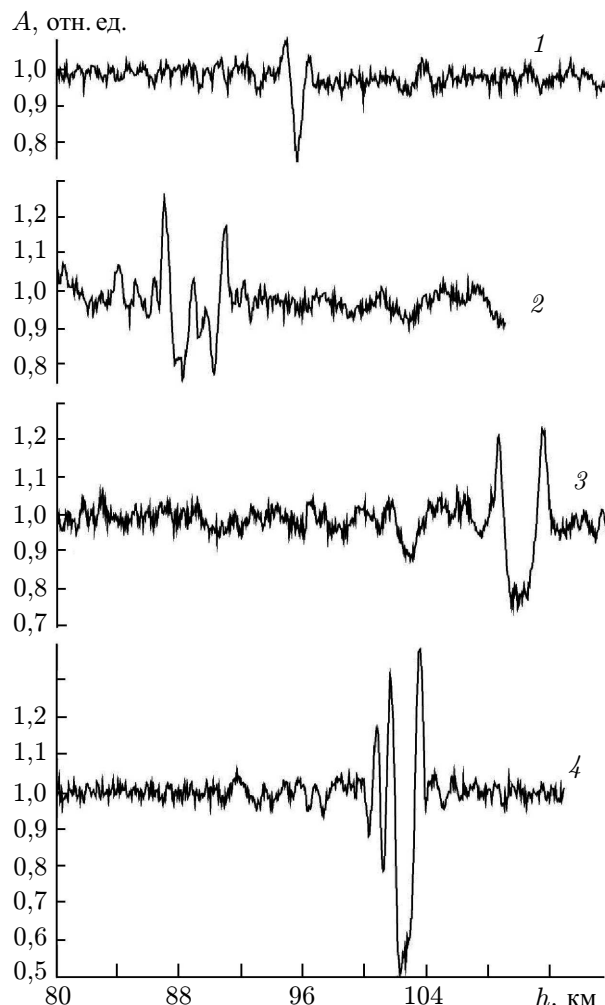


Рис. 7. Примеры зависимостей  $A(h)$  для  $E_s$ -структур второго типа: 07:34 UT 19.06.2015,  $81,8^\circ$  с. ш.,  $172,6^\circ$  в. д. (1); 11:35 UT 24.06.2015,  $65,8^\circ$  с. ш.,  $52,0^\circ$  з. д. (2); 00:49 UT 24.06.2015,  $72,4^\circ$  с. ш.,  $52,6^\circ$  з. д. (3); 10:54 UT 01.07.2015,  $65,8^\circ$  с. ш.,  $172,6^\circ$  в. д. (4)

высотного профиля  $N(h)$ . Для качественной оценки интенсивности спорадических образований в средних широтах и экваториальной области использовался  $S$ -индекс, определяемый по максимальным  $A_{\max}$  и минимальным  $A_{\min}$  значениям вариаций напряжённости поля на высотах появления  $E_s$ -образований [17, 26, 27]. Наш анализ полярной ионосферы показал, что использование  $S$ -индекса для оценки интенсивности  $E_s$ -структур не эффективно, т. к. при этом не учитывается толщина спорадического слоя. Для оценки параметров  $E_s$ -структур нужно учитывать и толщину слоя, и значения  $A_{\max}$ ,  $A_{\min}$ . Такой подход был применён в работе [27] при анализе сезонных вариаций спорадических слоёв в средних широтах.

Мы разделили зависимости  $A(h)$  на две качественно отличающиеся группы. К первой группе отнесены изменения  $A(h)$ , наблюдаемые в широкой области высот  $\Delta h$ , где максимальные и минимальные значения  $A$  изменяются очень сильно. На рис. 6 приведены примеры таких изменений амплитуды сигналов при радиопросвечивании «сильных» спорадических образований первого типа. Для последних характерно проникновение ионизирующего фактора до относительно малых высот. Среднее значение  $h_{\min} = 82$  км, а иногда структуры  $E_s$  наблюдаются даже при  $h_{\min} = 75$  км. Диапазон высот  $h$ , занимаемый образованиями первого типа, изменяется случайным образом в пределах  $18 \div 25$  км. В период, когда по данным [22] были сильные корональные выбросы массы и геомагнитный индекс  $K_p$  составлял величину от 4 до 8, в 31 сеансе наблюдались интенсивные изменения  $A(h)$ , соответствующие  $E_s$ -структурам первого типа.

Во второй группе диапазон изменений  $A$  и область высот, занимаемых  $E_s$ -структурами, меньше и наблюдаются узкие по высоте, почти подобные изменения напряжённости поля (см. рис. 7). Для приведённых на рис. 7 таких зависимостей  $A(h)$  характерен всплеск амплитуды, затем провал с последующим всплеском. Наличие таких структур наблюдается на разных высотах в диапазоне  $90 \div 110$  км. Толщина структур второго типа в среднем составляет около 3 км. Проявление таких структур в амплитудных данных не сопровождается их обнаружением в профиле  $N(h)$ , что объясняется малым приростом электронной концентрации в слое и его малой толщиной. Такие проявления спорадических образований второго типа наблюдались в 18 % всех 684 сеансов радиопросвечивания, как в спокойные сутки, так и при наличии корональных выбросов плазмы. Мы полагаем, что формирование таких слоёв  $E_s$  происходит из-за сдвига ветра, который считается наиболее вероятной причиной появления  $E_s$ -структур в средних широтах [28, 29]. Ветровым сдвигом называют ситуацию, при которой на разной высоте есть противоположно направленные горизонтальные компоненты скорости ветра. Кроме описанных зависимостей  $A(h)$ , наблюдаются случаи, когда в одном сеансе регистрируется влияние двух спорадических структур, расположенных на разных высотах: основной в районе перигея лучевой линии и дополнительной на высотах  $45 \div 55$  км. Такие зависимости  $A(h)$  указывают на одновременное наличие на лучевой линии двух  $E_s$ -структур, разнесённых на некоторое расстояние  $L$ . Это расстояние можно оценить, если известна разность  $\Delta h$  минимальной высоты основной и второй  $E_s$ -структур. Из геометрии задачи радиопросвечивания следует, что  $L^2 \approx 2a \Delta h$  (здесь  $a$  — радиус Земли), при  $\Delta h = 20$  км расстояние  $L \approx 500$  км. В некоторых сеансах радиопросвечивания регистрируется зависимость  $A(h)$ , для которой эти две области разделить затруднительно, т. к. они почти смыкаются и характерные изменения амплитуды сигнала охватывают широкий интервал высот. Всего было обнаружено 27 зависимостей  $A(h)$ , из которых ясно видно одновременное наличие двух интенсивных спорадических образований, отстоящих друг от друга на  $200 \div 500$  км, что указывает на нерегулярное пространственное расположение слоёв  $E_s$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на длительные исследования, природа и закономерности формирования  $E_s$ -структур даже в средних широтах и экваториальной области до настоящего времени остаются предметом изучения и дискуссий. Изучение радиозатменным методом закономерностей и статистики появления  $E_s$ -образований в полярной области находится на первом этапе. Мы условно выделили два характерных типа спорадических образований, обусловленных в одном случае «земными», динамическими причинами — сдвигами ветра, а в другом случае — высыпаниями энергичных частиц из магнитосферы, т. е. фактором, связанным с солнечным ветром и солнечной активностью.

Точность определений затменным методом профилей  $N(h)$  и причинно-следственные связи



разных явлений, обуславливающих вариации высотных профилей электронной концентрации полярной ионосферы, можно выявить при получении зависимостей  $N(h)$  для всей толщи ионосферы и  $A(h)$  для её нижней части при разной широте и долготе районов Арктики и Антарктики. Метод затменного радиопросвечивания на трассах спутник–спутник эффективен для решения этой трудной задачи, т. к. позволяет получать соответствующие данные. Этот метод даёт возможность изучать относительно малую изменчивость профилей  $N(h)$  на высотах 200–650 км, обусловленную, в основном, освещённостью района. Для изучения сильно изменчивой нижней ионосферы на высотах 75–120 км необходимо привлекать данные об изменениях амплитуды сигналов  $A(h)$ , т. к. они чётко показывают наличие спорадических структур и позволяют выделять два основных типа зависимостей  $A(h)$ . Для первого типа характерно влияние ионизирующего фактора даже на малых высотах и большая толщина возмущённой области. Этот тип  $E_s$ -структур обусловлен, по-видимому, высыпанием частиц с высокими энергиями из магнитосферы. Для второго типа характерна почти регулярная повторяемость структуры  $A(h)$ : всплеск, уменьшение и быстрое восстановление уровня амплитуды сигнала. Такое возмущение  $A(h)$  занимает узкую область по высоте, а вариации  $A(h)$  при этом невелики. Этот тип изменений  $A(h)$  регулярно наблюдался в районах средних широт и экваториальной области, его связывают с ветровыми сдвигами.

Для большой территории Арктики в рассматриваемый период удавалось осуществлять только от 37 до 60 затменных радиопросвечиваний ионосферы в сутки, что не позволяет определить пространственно-временные закономерности изменений высотных профилей электронной концентрации. Приведённые экспериментальные данные, полученные за 13 дней зондирования полярной ионосферы, не претендуют на описание общих закономерностей и статистики наблюдаемых явлений. В этой статье и публикациях [18–21] мы стремимся показать возможности нового метода изучения и дневной, и ночной полярной ионосферы Арктики.

Другой возможный подход к изучению изменчивой ионосферы Арктики методом затменного радиопросвечивания предполагает многократную регистрацию изменений фазы и амплитуды сигналов в относительно малом районе, где работает станция вертикального зондирования ионосферы. Нам не удалось получить одновременные данные радиозатменного и вертикального высотного зондирования, осуществлённых в близких районах. Из 684 сеансов радиозатменного зондирования было только три ситуации, когда при разном времени расстояние между районами затменного зондирования и ионосферной станцией в Соданкюля было около 500 км.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мизун Ю. Г. Полярная ионосфера. Л.: Наука, 1980. 216 с.
2. Геллер М. А., Волланд Х., Мэр Х. и др. Полярная верхняя атмосфера. М.: Мир, 1983. 456 с.
3. Hajj G. A., Romans L. I. // *Radio Sci.* 1998. V. 33, No. 1. P. 175.
4. Кучерявенков А. И., Яковлев О. И., Кучерявенкова И. Л., Самознаев Л. Н. // *Радиотехника и электроника.* 1998. Т. 43, № 8. С. 945.
5. Schreiner W., Sokolovsky S., Rocken C., Hunt D. // *Radio Sci.* 1999. V. 34, No. 4. P. 949.
6. Hajj G. A., Lee L. C., Pi X., et al. // *Terr. Atmos. and Oceanic Sci.* 2000. V. 11, No. 1. P. 235.
7. Hocke K., Igarashi K., Nakamura M., et al. // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2001. V. 63, No. 18. P. 1973.
8. Spalla P., Jakowski N., Wehrenpfenning A., Spencer P. First CHAMP mission results for gravity, magnetic and atmospheric studies / eds. G. Reigber, H. Lühr, P. Schwintzer. Berlin: Springer-Verlag. 2003. P. 545.
9. Викерт И., Яковлев О. И., Павельев А. Г. и др. // *Радиотехника и электроника.* 2004. Т. 49, № 10. С. 1184.

10. Yakowski N., Leitinger P., Angling M. // *Annals of Geophysics*. 2004. V. 47, No. 2–3. Sup. P. 1 049.
11. Wu D. L., Ao C. O., Hajj G. A., et al. // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110., No. A1. Art. no. A01306.
12. Павельев А. Г., Матюгов С. С., Яковлев О. И. // *Радиотехника и электроника*. 2008. Т. 53, № 9. С. 1 081.
13. Яковлев О. И., Ануфриев В. А., Викерт И., Матюгов С. С. // *Радиотехника и электроника*. 2008. Т. 53, № 2. С. 169.
14. Yakovlev O. I., Wikert J., Pavelyev A. G., et al. // *Acta Astronautica*. 2008. V. 63, No. 11–12. P. 1 350.
15. Матюгов С. С., Яковлев О. И., Ануфриев В. А. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 3. С. 181.
16. Матюгов С. С., Яковлев О. И., Павельев А. Г. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 4. С. 255.
17. Arras C., Wickert J. // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2018. V. 171. P. 60.
18. Яковлев О. И., Викерт И., Матюгов С. С., Ануфриев В. А. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2006. Т. 49, № 3. С. 185.
19. Яковлев О. И., Матюгов С. С., Ануфриев В. А. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 3. С. 181.
20. Яковлев О. И., Матюгов С. С., Ануфриев В. А., Черкунова Г. П. // *Космические исследования*. 2009. Т. 47, № 4. С. 291.
21. Yakovlev O. I., Wickert J., Pavelyev A. G., et al. // *Acta Astronautica*. 2010. V. 67. P. 315.
22. <http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CMEList>.
23. Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. (Eds.) *First CHAMP mission results*. Berlin: Springer, 2003. 559 p.
24. Foelsche U., Kirchengast G., Steiner A. *Atmosphere and climate studies by occultation methods*. Berlin: Springer, 2006. 336 p.
25. Steiner A., Pirscher B., Foelsche U., Kirchengast G. *New horizons in occultation research*. Berlin: Springer, 2009. 315 p.
26. Liou Y. A., Pavelyev A. G., Matyugov S. S., et al. *Radio occultation method for remote sensing of the atmosphere and ionosphere*. London: IntechOpen, 2010. 169 p.
27. Яковлев О. И., Павельев А. Г., Матюгов С. С. *Спутниковый мониторинг Земли. Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы*. М.: Либроком, 2010. 208 с.
28. Whitehead J. D. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1961. V. 20. P. 49.
29. Carrasco A. J., Batista I. S., Abdu M. A. // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, No. A6. Art. no. A06324.
30. Yeh W.-H., Huang C.-Y., Hsiao T.-Y., et al. // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, No. A11. Art. no. A11304.

Поступила в редакцию 12 июля 2018 г.; принята в печать 26 марта 2019 г.

## RESULTS OF STUDYING THE DAYTIME POLAR IONOSPHERE BY THE RADIO OCCULTATION METHOD ON SATELLITE-TO-SATELLITE PATHS

*O. I. Yakovlev, S. S. Matyugov, and A. A. Pavelyev*

We analyze specific features of the radio occultation method and the possibility of using it to study the altitude profiles of electron density and the characteristics of sporadic formations in the daytime polar ionosphere in the Arctic region at latitudes above 67° in the period from June 19 to July 1, 2015.

*O. И. Яковлев, С. С. Матюгов, А. А. Павельев*

203

The electron density at altitudes of 90–650 km is determined by ionospheric occultation sounding on GPS–FormoSat satellite-to-satellite paths, and its dependence on solar illumination at an altitude of 100 km is demonstrated. Data on sporadic  $E_s$  formations at altitudes of 80–120 km are presented. Two types of  $E_s$  structures attributed to the wind shear and precipitation of charged particles from the magnetosphere are discussed.