УДК 550.38+537.876.4+539.1.04

# СРАВНЕНИЕ НЕДЕЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ НИЖНЕЙ КРОМКИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВЫСЫПАНИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ 29 СЕНТЯБРЯ И 19 ОКТЯБРЯ 1989 г.

© 2022 г. М. И. Суховей<sup>1, \*</sup>, В. А. Шишаев<sup>2</sup>, Г. Ф. Ременец<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия <sup>2</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия \*e-mail: mikhail.sukhovey@gmail.com Поступила в редакцию 02.12.2020 г. После доработки 09.12.2021 г. Принята к публикации 27.01.2022 г.

Длительные высыпания солнечных протонов в атмосферу Земли, начавшиеся 29 сентября и 19 октября 1989 г., являются одними из самых сильных и продолжительных событий такого рода. Это обстоятельство позволило нам выполнить сравнение изменений электрической проводимости нижней кромки ионосферы. порождаемых этими высыпаниями, на основе электромагнитного эксперимента в диапазоне сверхдлинных волн (СДВ), теории ионосферных "скачков" для волноводного канала "Земля—ионосфера" и самосогласованного метода решения обратной СДВ-задачи. Для такого сравнения были проанализированы СДВ-вариации для часов заката для радиотрассы Алдра (Северная Норвегия) – Апатиты (Кольский п-ов) в течение нескольких суток после начала каждого из высыпаний. Результатами этих решений стали эффективная высота и коэффициенты отражения 1 и 2-го ионосферных лучей ("скачков") как функции времени для радиотрассы и установлен факт слабой зависимости комплексных коэффициентов отражения лучей от зенитного угла Солнца. Входными данными для получения перечисленных результатов были относительные изменения амплитуд и вариации фаз для трех радионавигационных частот РНС "ОМЕГА" из интервала 10-14 кГц. Для двух названных геофизических событий получен временной ход комплексного коэффициента отражения (его модуля и эффективной высоты отражения монохроматического сигнала) и проведено сопоставление его со спутниковыми данными по вариациям плотностей потоков высыпающихся протонов.

DOI: 10.31857/S0016794022040150

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Обзор научной литературы по особенностям распространения сверхдлинных радиоволн (СДВ) в условиях высыпания протонов представлен в работах [Белоглазов и Ременец, 1982, 1990]. Другой обзор [Miroshnichenko et al., 2000] посвящен анализу высыпания солнечных протонов (солнечных космических лучей – СКЛ), которое последовало за солнечной вспышкой 29 сентября 1989 г. Вспышка наблюдалась в большом диапазоне длин волн (от дециметровых радиоволн до гамма-лучей) и энергий частиц (для электронов с энергией меньше 2 МэВ, для протонов меньше нескольких ГэВ). Это геофизическое событие представляет особый интерес, поскольку является наиболее интенсивным в релятивистском диапазоне энергий протонов после явления такого же рода 23 февраля 1956 г.

Высыпания СКЛ, оказывающие существенное влияние на распространение СДВ являются достаточно редкими событиями (~70 высыпаний за все время наблюдений, начавшихся с первой половины 40-х годов). Несмотря на редкость геофизических возмущений этого типа, вопросу о влиянии высыпания протонов на распространение СДВ было посвящено большое число работ. Сегодня интерес к обсуждаемым высыпаниям, особенно к их релятивистским частям, связан с химическими реакциями в нижней атмосфере, куда такие протоны проникают, и соответствующими погодными явлениями. Для нас в данном исследовании важны работы, в которых представлены или обсуждаются результаты решения обратных СДВ-задач в условиях корпускулярных высыпаний. Эти работы можно разделить на две группы по типу используемого метода наземного СДВзондирования ионосферы. К первой группе относятся две уникальные работы, в которых исполь-

зуется импульсное вертикальное СДВ-зондирование [Helms and Swarm, 1969; Field et al., 1983]. В первой из них виртуальная высота отражения импульса (измерения на ст. Berd, Антарктида) сравнивается с потоком солнечных протонов с энергией E > 10 МэВ измеренным на спутнике Explorer-41 [Field et al., 1983]. При практически нормальном падении импульсов на ионосферу (расстояние между наземными передатчиком и приемником ~20 км) виртуальная высота не опускалась ниже 60 км и не поднималась выше 77-80 км для 25-29 сентября 1969 г. Основным результатом второй работы стали фрагменты высотных профилей электронной концентрации для 6 полярных ночей с 27 сентября по 2 октября 1978 г., полученные в результате решения обратной СДВзадачи для указанного импульсного зондирования.

Ко второму типу работ относятся, например, работы [Ременец и Белоглазов, 1982, 1985; Ременец и др., 1989; Remenets and Beloglazov, 1992; Remenets et al., 2020], в которых исследуется поведение эффективной высоты волноводного канала "Земля-ионосфера" и модуля коэффициента отражения первого ионосферного луча ("скачка") [Bremmer, 1949; Гюннинен и Забавина, 1966] от нижней ионосферы в процессе геофизических возмущений 16 февраля и 29 сентября 1989 г. В указанных последних работах импульсного зондирования ионосферы не было, а была непрерывная регистрация "монохроматических" сигналов на трех рабочих для РНС "ОМЕГА" частотах. В случае февральского высыпания протонов в интервале 9–13 UT следует, что эффективная высота в максимуме возмущения (10 UT) опустилась с 63-67 км до 44-47 км. В данной работе речь идет об эффективной высоте модельного сферического волновода "Земля-ионосфера". К определению этого понятия вернемся ниже. Модуль коэффициента отражения первого ионосферного сигнала (первого луча) во время всего события оставался на уровне 0.6. В максимуме СДВ-возмущения электронная концентрация в окрестности высоты 45 км была оценена в несколько тысяч эл  $cm^{-3}$ . Мы не останавливаемся на результатах анализа сентябрьских высыпаний в данном месте, так как целью настоящего исследования, в частности, является сравнение "сентябрьских" опубликованных результатов с новыми "октябрьскими" результатами для 1989 г.

Необходимо отметить, что "сентябрьскому" высыпанию протонов за 1989 г. посвящена работа [Ondrášková et al., 2003], в которой проводится численное моделирование высотного распределения концентраций ионизированных компонент атмосферы на высотах *D*-слоя ионосферы. Используемая фотохимическая модель, являющаяся одномерной и зависящей от времени, позволила вычислить, в частности, профиль электронной концентрации в разные моменты времени этого явления на высотах от 50 до 100 км.

Наша работа посвящена решению обратной СДВ-задачи, т.е. восстановлению свойств проводимости нижней кромки ионосферы (слоя ионосферы, который формирует отраженный СДВсигнал по причине высотной неоднородности электрической проводимости этой части ионосферы). Целью нашей работы является сравнение суточных изменений (при переходе от дневных условий на радиотрассе к ночным) свойств электрической проводимости нижней кромки ионосферы на полностью авроральной радиотрассе (Алдра–Апатиты) для многосуточного, уже здесь обсуждаемого высыпания СКЛ, начавшегося 29 сентября 1989 г., с аналогичными суточными изменениями во время длительного высыпания СКЛ, начавшегося 19 октября 1989 г. Каждое из этих событий продолжалось более недели, и для каждого из них имеются спутниковые данные по плотностям их потоков.

Рабочим аналитическим аппаратом, используемым нами в данной работе, является решение обратной СДВ-задачи самосогласованным методом [Ременец и Белоглазов, 1985; Remenets and Beloglazov, 1992]. Этот метод представляет собой численный итерационный алгоритм на основе решения прямых СДВ-задач, под которыми понимается расчет компонент электромагнитного поля от дипольного источника, расположенного в сферической модели волноводного канала "Земля-ионосфера". Если модель обладает центральной симметрией, то прямая СДВ-задача решаема и методом "скачков" [Гюннинен и Забавина, 1966], и методом нормальных волн [Макаров и Новиков, 1978; Макаров и др., 1991]. Мы используем первый метод, благодаря которому поле в интересующей нас точке земной сферической поверхности от наземного источника на расстоянии меньше 1000 км представимо суммой трех слагаемых: дифракционной волной Ватсона-Фока [Фок, 1970; Гюннинен и др., 1964], 1-м ионосферным скачком, имеющим одно отражение от ионосферы, и 2-м ионосферным скачком, отражающимся от ионосферы дважды. Суть нашего решения в минимизации невязки между вариациями измеряемых СДВ-величин и их расчетными значениями. Минимизация осуществляется по значениям параметров (в нашем случае двух параметров) в фиксированный момент времени исследуемого возмущения. Эти параметры характеризуют электрические свойства нижней кромки ионизованного слоя, и они не могут быть получены из геофизических данных. Временные функции этих параметров входят в аналитические выражения для 1 и 2-го скачков. Поэтому найденное их поведение во времени обеспечивает нам успешность расчета амплитуд и фаз СДВ-величин для итерационного процесса с функционалом-невязкой. Так как в описанном алгоритме физическая первопричина СДВ-возмущения никак не задействована, то качественно описанный метод мы называем самосогласованным. Однако обсуждаемая задача является неоднозначной. Для получения достоверного решения требуется знать условия освещенности на радиотрассе.

Неотъемлемым элементом описываемого алгоритма является линейная аппроксимация модуля и аргумента комплексных коэффициентов отражения обоих ионосферных скачков от верхней условной (виртуальной) верхней границы "воздух-ионосфера" как функций угла падения волны в модели приземного волноводного канала, причем предельные их значения при предельно скользящем угле падения волны принимаются равными 1 для модулей и  $\pi$  рад для аргументов. Названные коэффициенты входят в аналитические выражения для используемых "скачков" и являются входными данными для прямых СДВзадач. В нашем случае обратной задачи модуль коэффициента отражения для 1-го "скачка" R(t)при известном значении высоты верхней условной границы является выходным параметром обратной СДВ-задачи. Значение этого же модуля для 2-го "скачка" находится элементарно из линейной аппроксимации. Вторым нашим выходным параметром обратной СДВ-задачи является эффективная высота h(t), определяемая как высота приземного волновода, при которой аргумент коэффициента отражения для волны со средней рабочей частотой (12.1 кГц) для интервала углов падения волн обоих "скачков" на верхнюю границу равен константе  $\pi$  рад.

Выше качественно описанный метод был разработан для применения в нестационарных условиях, когда число относительных изменений амплитуд и приращений фаз принимаемых сигналов существенно превышает число выходных параметров данного метода. Эта избыточность позволяет восстановить абсолютные значения выходных параметров по приращениям амплитуд и фаз. В данной работе мы ограничились только переходными процессами день/ночь, так как переходные процессы ночь/день протекают намного быстрее и допустимый минимальный аппаратурный временной шаг существенно больше шага, требуемого для корректного временного анализа. По данным спутниковых измерений мы можем судить о том, что два высыпания протонов сильно отличаются по интенсивности потоков протонов и вариации потоков не являются монотонными (в течение нескольких суток имеют место усиления высыпаний), поэтому мы сравниваем динамику R(t) и h(t) при переходном процессе день/ночь только в те даты, когда интенсивность потоков протонов была примерно одинаковой. Анализ СДВ-возмущения, вызванного высыпанием протонов 29 сентября, был проведен с помощью самосогласованного СДВ-метода и физического анализа в работах [Remenets and Beloglazov, 1992, 2013; Remenets et al., 2020]. В них была установлена последовательность геофизических событий, которые стали причиной вариаций СДВ-сигналов в эту календарную дату. В последней из указанных работ найдены изменения свойств электрической проводимости нижней кромки ионосферы во время переходных процессов день/ночь в течение недели после начала высыпания протонов 29 сентября и было установлено, что суточные вариации, хотя и слабые, наблюдаются даже при максимальной (для этого события) интенсивности потока протонов. Наша работа посвящена сравнению указанных результатов с нашими новыми результатами.

### 2. ФИЗИЧЕСКАЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Мы рассматриваем обратную СДВ-задачу об определении абсолютных значений и изменений во времени параметров, характеризующих электрические свойства нижней кромки ионосферы, по изменениям трех "монохроматических" СДВ-сигналов с близкими частотами  $f_1 = 10.2$  кГц,  $f_2 = 12.1 \text{ к}$ Гц и  $f_3 = 13.6 \text{ к}$ Гц, распространяющихся вдоль полностью авроральной радиотрассы Алдра–Апатиты (66.7° N, 13.1° E – 67.6° N, 33.4° E). Перед решением обратной задачи вариации относительных амплитул и фаз СДВ-сигналов оцифровывались с бумажных лент самописцев с шагом 100 с и сглаживались с помощью скользящего прямоугольного "окна" шириной 300 с. Для корректного решения задачи мы должны обеспечить непрерывность и полноту исходных данных, поэтому экспериментальные данные, записанные с пропусками на одной или нескольких частотах, при анализе не использовались. Исходные экспериментальные вариации обсуждаемых сигналов изображены на рис. 1 (сентябрьское СКЛ) и 2 (октябрьское СКЛ). В каждом столбце показаны вариации амплитуд и фаз трех сигналов во время переходного процесса день/ночь, когда зенитный угол Солнца был в пределах 92° <  $\chi$  < 98°. В самом левом столбце показаны вариации в невозмущенных условиях в день, предшествующий началу высыпания СКЛ, в остальных столбцах изображены первые пять суток после начала высыпания.

Нашей конкретной радиотрассе Алдра–Апатиты мы сопоставляем модельный сферический волновод с однородными по продольной координате свойствами, на нижней стенке которого ставятся импедансные граничные условия (соответствующие скалистому грунту со значением относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_m = 20$  и электрической проводимостью  $\sigma = 10^{-3}$  Ом<sup>-1</sup> м<sup>-3</sup>),



Рис. 1. Экспериментальные относительные вариации амплитуд (сверху) и фаз (снизу) трех сигналов, распространяющихся вдоль радиотрассы Алдра-Апатиты как функции зенитного угла Солнца в средней точке радиотрассы во время закатных часов с 28 сентября по 3 октября 1989 г. В каждом столбце изображен переходной процесс день/ночь на радиотрассе, которому соответствуют, согласно нашему определению, значения зенитного угла Солнца в интервале  $92^{\circ} < \chi < 98^{\circ}$  в средней точке радиотрассы. В самой левой колонке изображены вариации параметров сигналов в невозмущенных условиях.

а электрические свойства верхней условной границы приземного волновода задаются комплексным коэффициентом отражения как линейной функцией скользящего угла падения волны на границу. Наклон линейной зависимости для модуля коэффициента отражения определяется его значением для первого скачка. Это значение является искомым для каждого момента времени исследуемого возмущения. Однородность модельного волновода в каждый момент возмущения является оправданным приближением в наших конкретных условиях (длина трассы 885 км, и она направлена с запада на восток), хотя на радиотрассе и имеют место переходные условия день/ночь. Это утверждение вытекает из сопоставления экспериментальных и расчетных временных вариаций сигналов, приводимых в конце статьи. Оправданность этого утверждения подтверждается также нашей оценкой [Remenets et al., 2020].

Переходим к определению искомых параметров, используемых нами при решении обратных задач распространения. Нижняя и верхняя границы модельного волновода разнесены по радиальной переменной на значение эффективной высоты h(t), которая является искомой для каждого момента времени t исследуемого возмущения. Она является эффективной при следующем постулировании ее свойств. Аргумент комплексного коэффициента отражения как функция угла

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62

падения электромагнитной волны на верхнюю границу раздела при скользящих углах для средней рабочей частоты  $f_2 = 12.1$  кГц есть константа, равная  $\pi$  рад:

# $\arg R_{f_2}(\psi) = \pi.$

Для соседних частот  $f_1 = 10.2$  кГц и  $f_3 = 13.6$  кГц зависимости аргументов коэффициентов отражения от этого же угла линейные и отличаются друг от друга знаками их производных [Белоглазов и Ременец, 1982; Ременец и Белоглазов, 1982; Remenets and Beloglazov, 1992]:

arg 
$$R_{f_1,f_3}(\psi) = \pi \pm 0.35 \frac{\pi/2 - \psi}{\pi/2 - 1}$$

Зависимость модулей коэффициентов отражения R(t) первого ионосферного луча для трех рабочих частот принимаются одинаковым для трех частот. Модуль коэффициента отражения для второго луча постулируется независимым от частоты и находится из линейной аппроксимации модуля коэффициента отражения как функции угла падения волны  $\psi$ . Эта аппроксимация есть прямая, проходящая через 2 точки:  $R(\psi) = 1$  при  $\psi = \pi/2$  и  $R(\psi) = R$ , где R – входной параметр обратной задачи, то есть значение модуля коэффициента отражения для первого скачка:

$$R(\psi) = R + (1-R)\frac{\psi - \psi_1}{\pi/2 - \psi_1}$$

**№** 4 2022



**Рис. 2.** Экспериментальные относительные вариации амплитуд (сверху) и фаз (снизу) трех сигналов, распространяющихся вдоль радиотрассы Алдра—Апатиты как функции зенитного угла Солнца в средней точке радиотрассы во время закатных часов с 18 октября по 23 октября 1989 г. В каждом столбце изображен переходной процесс день/ночь на радиотрассе, которому соответствуют, согласно нашему определению, значения зенитного угла Солнца в интервале  $92^{\circ} < \chi < 98^{\circ}$  в средней точке радиотрассы. В самой левой колонке изображены вариации параметров сигналов в невозмущенных условиях.

Если коэффициент отражения R для 2-го луча оказывается меньше 0, то он полагается равным 0.

Искомые временные функции R(t) и h(t) в момент времени  $t_m$  находятся как сумма приращений за все предшествующие малые промежутки времени  $\Delta t_n$  по формулам:

$$h(t_m) \equiv h_m = h_0 + \sum_{n=1}^m \Delta h_n,$$
  
$$R(t_m) \equiv R_m = R_0 + \sum_{n=1}^m \Delta R_n.$$

Вариации  $\Delta h_n$  и  $\Delta R_n$  могут быть найдены, если мы знаем безразмерную комплексную функцию ослабления СДВ-сигнала в виде W(h, R), которая по определению есть отношение поля в модельном сферическом волноводе к полю в свободном пространстве на данном расстоянии от источника [Гюннинен и Забавина, 1966] или над идеально проводящей плоскостью [Гюннинен и др., 1964]. Тогда используя экспериментальные относительные вариации амплитуд и фаз трех монохроматических сигналов  $\{\Delta E_i, \Delta \varphi_i\}_{i=1, 2, 3}$  на временном шаге  $\Delta t_n$  мы можем восстановить вариации  $\Delta h_n$  и  $\Delta R_n$ , решив систему двух уравнений из набора шести линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{split} \frac{\Delta E_{i,n}}{E_{i,0}} &= \frac{\Delta R_n}{|W_i(h_0, R_0)|} \frac{\partial}{\partial R} |W_i| (h_{n-1}, R_{n-1}) + \\ &+ \frac{\Delta h_n}{|W_i(h_0, R_0)|} \frac{\partial}{\partial h} |W_i| (h_{n-1}, R_{n-1}), \\ \Delta \varphi_{i,n} &= \Delta R_n \frac{\partial}{\partial R} \arg W_i (h_{n-1}, R_{n-1}) + \\ &+ \Delta h_n \frac{\partial}{\partial h} \arg W_i (h_{n-1}, R_{n-1}), \end{split}$$

где i = 1, 2, 3 -это номер частоты, n = 1, ..., N -порядковый номер временно́го отсчета  $t_n$ , а  $W_i = W(f_i)$ .

"Начальные значения"  $h_0$  и  $R_0$  находятся как обеспечивающие минимум функционалу невязки в двумерной области разумных пределов для h и R: 40 км < h < 80 км, 0.4 < R < 0.9 с шагом для h 1 км, а для R 0.05:

$$G(h_0, R_0) = \sum_{i=1}^{3} \sum_{n=1}^{N} \left[ \left( \frac{E_{i,n}^W - E_{i,n}}{E_{i,0}} \right)^2 + \left( \frac{\varphi_{i,n}^W - \varphi_{i,n}}{\Delta \varphi_i} \right)^2 \right].$$

Этот функционал невязки состоит из нормированных квадратов разностей между экспериментальными значениями  $E_{i,n}$ ,  $\varphi_{i,n}$  и функцией ослаб-

ления  $E_{i,n}^{W} = |W_i(h_n, R_n)|, \varphi_{i,n}^{W} = \arg(W_i(h_n, R_n)).$ 

Амплитуды нам известны в относительных единицах, поэтому они нормированы на единицу в начальный момент времени. Фаза измерялась в

микросекундах как вариация на временной шкале нуля синуса принимаемого сигнала относительно нуля синуса опорного высокостабильного сигнала той же частоты в точке приема. Для того чтобы вклады амплитудных и фазовых слагаемых в функционале-невязке были безразмерными, приращения фазы нормировались на разницу между максимальным и минимальным значением фазы ф, за весь исследуемый временной интервал и принимались равными в начальный момент анализа.

Функция ослабления W(h, R) вычислялась в двухскачковом приближении:

$$\begin{split} W &= W_0 + W_1 + W_2, \quad W_0 = 0.65 \exp(i), \\ W_1 &= 0.5 \alpha_1 \sin^2 I_1 \left( 1 + R_g \left( I_1, f_i \right) \right)^2 \left| R_i \left( \psi_1, f_i \right) \right| \times \\ &\times \exp\left( i \left( k_{0i} \left( \tau_1 - D \right) + \arg\left( R_i \left( \psi_1, f_i \right) \right) \right) \right), \\ W_2 &= 0.5 \alpha_2 \sin^2 I_2 \left( 1 + R_g \left( I_2, f_i \right) \right)^2 \times \\ &\times \left| R_i \left( \psi_2, f_i \right) \right|^2 \left( R_g \left( I_2, f_i \right) \right) \times \\ &\times \exp\left( i \left( k_{0i} \left( \tau_2 - D \right) + 2 \arg\left( R_i \left( \psi_2, f_i \right) \right) \right) \right), \\ \alpha_q &= \left( \frac{2q \sin\left( \theta / 2q \right)}{\sin \theta} \frac{\cos \psi_q}{\cos I_q} \right)^{\frac{1}{2}}, \\ &R_g \left( I_q, f_i \right) = \frac{\cos I_q - \delta g_i}{\cos I_q + \delta g_i}. \end{split}$$

где  $W_0$  — это функция ослабления дифракционной волны Ватсона-Фока (ее значение принято нами одинаковым для всех трех рабочих частот) [Гюннинен и др., 1964];  $W_1$  и  $W_2$  – это функции ослабления для 1 и 2-го ионосферных "скачков". В приведенных формулах индекс i при частоте fуказывает на ее номер; *R<sub>i</sub>* –коэффициент отражения на частоте  $f_i$ ;  $k_{0i}$  – волновое число для электромагнитной волны с частотой  $f_i$  в свободном пространстве;  $\alpha_q$  – множители, учитывающие фокусировку и дефокусировку лучей при их отражении от нижней и верхней сферических границ модельного волновода;  $\theta$  – угловое расстояние между источником и приемником в сферической системе координат с ее центром в центре модельной Земли;  $\psi_q$  – угол падения q-го луча на ионосферу;  $I_q$  — угол выхода луча из источника;  $R_{g}(I_{q}, f_{i})$  – коэффициент отражения 1 и 2-го луча от земной поверхности;  $\delta g_i$  – импеданс земной поверхности на частоте  $f_i$ ;  $R_i(\psi_q, f_i)$  – комплексные коэффициенты отражения 1 и 2-го ионосферных лучей;  $\tau_q$  – расстояние, проходимое лучом с номером q и D – расстояние по геодезической линии между источником и приемником.

### 3. СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПОТОКАМ СКЛ В СЕНТЯБРЕ И ОКТЯБРЕ 1989 г. И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ СДВ-ЗАДАЧ

Мы отметили выше, что активность Солнца в 1989 г. породила в сентябре-октябре два важных, интересных для физиков, длительных высыпаний СКЛ, потоки которых были измерены на спутниках. В верхней атмосфере и нижней ионосфере они изменили электрические свойства среды и соответственно проявили себя в вариациях СДВ-сигналов на высокоширотных радиотрассах. Ранее для первого явления с началом 29 сентября была решена самосогласованная обратная задача распространения сверхдлинных радиоволн в полосе частот 10-14 кГц [Remenets et al., 2020], в результате чего мы имеем временную динамику эффективной высоты и модулей коэффициентов отражения двух лучей (для 1-го непосредственно, а для 2-го с помощью вычисления по формуле линейной аппроксимации зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения волны).

Для количественного сопоставления потоков солнечных протонов с изменениями электрических свойств средней атмосферы в названных событиях мы использовали результаты измерений на спутнике GOES 6 (https://satdat.ngdc.noaa.gov). Плотности потоков протонов в интегральных каналах с энергиями *E* > 1, *E* > 10, *E* > 50 и *E* > 100 МэВ во время пяти суток после начала каждого из двух событий изображены на рисунках 3 и 4. Нас интересуют протоны с энергией E > 10 МэВ, так как протоны с меньшей энергией не вносят существенного вклада в ионизацию на высотах ниже 60 км [Gordon et al., 1978].

Первое из двух высыпаний СКЛ началось 29 сентября 1989 г. в 12 UT, рис. 3. Максимальное значение потока протонов с энергией  $E > 10 \text{ M} \Rightarrow B$ в интересующем нас недельном временном интервале (на закате солнца или, для нашей радиотрассы, с 15 до 19 UT) 30 сентября составляло 1 ×  $\times 10^3$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup> (здесь и далее обсуждаемая величина потока является усредненным за 4 ч значением с 15 до 19 UT). Максимальное значение плотности потока протонов с энергией Е > > 100 МэВ оказалось в 3 раза меньше. После того как плотности потоков достигли максимальных значений, они уменьшались с нарушением монотонности 6 октября.

Второе из двух обсуждаемых высыпаний протонов началось 19 октября 1989 г. в 13 UT. Плотности потоков для этого события изображены на рис. 4. После начала высыпания максимальные значения потоков были достигнуты 20 октября и имели значения  $2 \times 10^4$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup> для E > 10 МэВ (в 20 раз плотнее, чем в предыдущем событии) и  $4 \times 10^2$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup> для E > 100 МэВ (на 30% плот-



**Рис. 3.** Потоки протонов, измеренные на спутнике GOES 6 с 28 сентября по 6 октября 1989 г. Начало высыпания протонов 29 сентября в 12 UT.



**Рис. 4.** Потоки протонов, измеренные на спутнике GOES 6 с 18 октября по 23 октября 1989 г. Начало высыпания протонов 19 октября в 12 UT.

нее, чем у предшествующего события). 22 октября монотонное уменьшение потока нарушилось повторным нарастанием плотности потока протонов.

Максимумы потоков протонов не могут быть локализованы с достаточной точностью: первое событие имело максимальные значения потоков с E > 10 МэВ 29 и 30 сентября (переходные условия день/ночь в эти даты полностью попадают в область максимума), второе событие имело максимум 20 октября (переходные условия примерно попадают в ту область, где имеет место максимум).

Полученные нами решения обратных задач для события, начавшегося 29 сентября, изображены на рис. 5 [Remenets et al., 2020]. На рисунке 6 изображены аналогичные решения для второго события, начавшегося 19 октября. Эти численные результаты являются основными для нашей работы. Для каждого высыпания изображены решения обратных задач: восстановленная динамика коэффициента отражения R(t) и эффективной высоты h(t) в зависимости от зенитного угла Солнца  $\chi$ . В каждом столбце изображено решение для переходных условий день/ночь, что соответствует диапазону зенитных углов 92° <  $\chi$  < 98° в средней точке радиотрассы. На обоих рисунках левый столбец соответствует спокойным условиям (сутки до начала высыпания СКЛ), а остальные соответствуют пяти суткам после начала высыпаний СКЛ.

Корректность и погрешность решения обратной задачи полученного с помощью самосогласованного метода оценивается из расхождения экспериментальных и расчетных значений вариаций амплитуд и фаз трех СДВ-сигналов. Пример такого сопоставления показан на рис. 7, где сопоставлены экспериментальные амплитуды и фазы трех сигналов с расчетными, причем амплитуды нормированы в начальный момент временного анализа, а фазы нормированы на величину максимального изменения фазы за исследуемый интервал времени. На рисунке изображены три переходных процесса: в спокойных условиях 18 октября и в условиях высыпания СКЛ 19 и 20 октября. Для оценки неопределенности абсолютных значений эффективной высоты и коэффициента отражения используются величины расхождений решений, полученных при независимом решении обратных задач в прямом и обратном течении времени, рисунки 5 и 6. Из этих рисунков видно,



**Рис. 5.** Вариации модуля коэффициента отражения *R* (сверху) для первого ионосферного луча и эффективной высоты *h* (снизу) как функции времени в в часы заката на радиотрассе Алдра—Апатиты для календарных дат первого высыпания протонов, начавшегося 29 сентября. На каждой горизонтальной оси графиков изображены жирными линиями временны́е интервалы, которым соответствуют значения зенитного угла Солнца  $92^\circ < \chi < 98^\circ$  в средней точке радиотрассы. На графиках изображено решение обратной задачи в прямом направлении времени (сплошные линии), а также решение обратной задачи в обратном направлении времени (штриховые линии).



Рис. 6. Результаты, полностью аналогичные результатам, представленным на рис. 5, но для календарных дат второго высыпания протонов, начавшегося 19 октября.

что погрешность для эффективной высоты оценивается в 3–4 км для сильно возмущенных условий (первые сутки после начала высыпаний) и 1– 2 км для спокойных условий. Для коэффициента отражения погрешность составляет 0.2 для сильно возмущенных условий и 0.05-0.1 для спокойных условий.

В дополнение к описанным рисункам приводим таблицы 1 и 2, в которых представлены "предельные" значения *h* и *R* из описанных графиков,



**Рис.** 7. Сравнение экспериментальных (сплошная линия) и расчетных (штриховая линия) амплитуд (слева) и фаз (справа) для трех частот и трех дат: день до начала высыпания протонов, первый и второй день после начала высыпания протонов (18–20 октября 1989 г.).

соответствующие началу переходного процесса день/ночь на радиотрассе, когда  $\chi < 92^\circ$  во всех ее точках, и концу этого переходного процесса, когда  $\gamma > 98^{\circ}$  во всех точках радиотрассы. В полностью дневных и полностью ночных условиях на радиотрассе эффективная высота и коэффициент отражения не являются константами из-за флуктуационной изменчивости электрических свойств среды, поэтому в обсуждаемых таблицах представлены значения этих параметров в те моменты времени, когда зенитный угол Солнца в средней точке радиотрассы равняется  $\chi = 92^{\circ}$  (начало переходных условий) и  $\chi = 98^{\circ}$  (конец переходных условий). Из этих таблиц видно, что в спокойных условиях 28 сентября эффективная высота изменилась с 64 км днем до 78 км ночью, а в случае спокойных условиях 18 октября с 63 км днем до 70 км ночью. Разницу в ночных условиях следует связывать с активностью авроральных электронов. Во время максимума первого события, начавшегося 29 сентября, эффективная высота 30 сентября равнялась 49 км в начале переходных условий и 53 км в конце. Во время абсолютного максимума второго высыпания протонов эффективная высота 20 октября принимала значения 48 км в начале и 51 км в конце переходных условий. То есть, прирост эффективной высоты  $\Delta h$ при отключении прямого облучения атмосферы

электромагнитной солнечной радиацией составляет 4 и 3 км, соответственно для максимумов обоих событий. Хотя неопределенность указанных величин оценивается нами в обсуждаемых случаях в 3-4 км, полученный факт чувствительности СДВ-величин к изменениям условий освещенности на высоте регулярного Д-слоя ионосферы при мощном "постоянном" потоке СКЛ не вызывает сомнения. Таким образом мы показали, что зависимость параметров h(t) и R(t) от зенитного угла имела место во все сутки наблюдений, хотя сильно ослабевала по сравнению со спокойными условиями. Зависимость от условий освещенности не исчезла полностью несмотря на то, что обсуждаемые протонные высыпания были одними из самых сильных среди известных событий.

Среди описанных решений мы выбрали два, по одному из каждого события, которым соответствуют близкие значения потока протонов с энергией E > 10 МэВ: повторное повышение интенсивности потока протонов 23 октября и начало первого события 29 сентября. 29 сентября эфективная высота увеличилась от 51 до 55 км при потоке протонов, равном  $9 \times 10^2$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup>. 23 октября эфективная высота изменилась от 52 до 59 км, при практически такой же плотности потока протонов  $1 \times 10^3$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup>. Перепады

Дата	Начало переходных условий $(\chi = 92^{\circ})$		Конец переходных условий $(\chi = 98^\circ)$		Поток протонов <i>E</i> > 10 МэВ,	Поток протонов <i>E</i> > 100 МэВ,
	<i>h</i> , км	R	<i>h</i> , км	R	$cm^{-2} c^{-1} cp^{-1}$	$cm^{-2} c^{-1} cp^{-1}$
28 сентября	64	0.4	78	0.7	$1 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-2}$
29 сентября	51	0.75	55	0.8	$9 \times 10^{2}$	$3 \times 10^{2}$
30 сентября	49	0.85	53	0.85	$1 \times 10^{3}$	$4 \times 10^1$
1 октября	53	0.65	63	0.75	$7 \times 10^{1}$	$3 \times 10^{0}$
2 октября	56	0.7	64	0.8	$2 \times 10^{1}$	$1 \times 10^{0}$
3 октября	56	0.75	65	0.8	$9 \times 10^{0}$	$7 \times 10^{-1}$

Таблица 1. Значения эффективной высоты h и коэффициента отражения R в дневных и ночных условиях

Примечание. В левой части показаны параметры, характеризующие комплексный коэффициент отражения от ионосферы в невозмущенных условиях 28 сентября и возмущенных условиях с 29 сентября по 3 октября. В правой части показаны усредненные за 4 часа потоки протонов во время переходного процесса день/ночь с энергиями E > 10 и E > 100 МэВ.

Таблица 2. Значения эффективной высоты *h* и коэффициента отражения *R* в дневных и ночных условиях

Дата	Начало переходных условий $(\chi = 92^{\circ})$		Конец переходных условий $(\chi = 98^{\circ})$		Поток протонов E > 10  MэB,	Поток протонов <i>E</i> > 100 МэВ,
	<i>h</i> , км	R	<i>h</i> , км	R	$cm^{-2} c^{-1} cp^{-1}$	$cm^{-2} c^{-1} cp^{-1}$
18 октября	63	0.75	70	0.9	$1 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-2}$
19 октября	52	0.75	56	0.8	$1 \times 10^{2}$	$5 \times 10^{1}$
20 октября	48	0.45	51	0.4	$2 \times 10^{4}$	$4 \times 10^{2}$
21 октября	49	0.95	52	0.95	$4 \times 10^{2}$	$8 \times 10^{0}$
22 октября	51	0.65	58	0.75	$7 \times 10^{1}$	$2 \times 10^{0}$
23 октября	52	0.5	59	0.4	$1 \times 10^{3}$	$5 \times 10^{1}$

Примечание. В левой части показаны параметры, характеризующие комплексный коэффициент отражения от ионосферы в спокойных условиях 18 октября и в возмущенных условиях 19–23 октября. В правой части показаны усредненные за 4 часа потоки протонов во время переходного процесса день—ночь с энергиями E > 10 и E > 100 МэВ.

эффективной высоты  $\Delta h$  при переходных условиях день/ночь равнялись 4 и 7 км соответственно. Это различие значений гипотетически указывает на то, что повторное высыпание 23 октября имеет меньшую жесткость потока по сравнению с началом первого события 29 сентября. Этот вывод согласуется с тем фактом, что значения потоков протонов с энергией E > 100 МэВ в эти даты отличались в 6 раз (рис. 3 и рис. 4, табл. 1 и табл. 2).

## 4. СРАВНЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ НИЖНЕЙ КРОМКИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ДРУГИХ ГЕФИЗИЧЕСКИХ СОБЫТИЯХ В СЕНТЯБРЕ И ОКТЯБРЕ 1989 г.

Перед высыпанием солнечных протонов 29 сентября в ночных условиях 28 сентября наблюдались сильные вариации СДВ-сигналов изза активности авроральных электронов. Решение обратной задачи для этого события в интервале

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62 № 4 2022

19-22 UT представлено на рис. 8, где изображены ночные вариации эффективной высоты h(t) и модуля коэффициента отражения R(t) в зависимости от времени UT. Это решение сшивается с решением обратной задачи на закате 28 сентября с 15 до 19 UT, представленном на рис. 5. Значения эффективной высоты из этих двух решений в 19 UT совпали (78 км), а значения коэффициента отражения получились относительно близкими и равными 0.7 и 0.9 соответственно. Эффективная высота h(t) во время высыпания авроральных электронов в указанные часы достигала минимального значения 66 км, а коэффициент отражения *R* уменьшился до 0.5. Эти значения сблизились с невозмущенными дневными значениями для авроральной области, которые составляют 58-62 км [Белоглазов и Ременец, 1982; Ременец и Белоглазов, 1982, 1985]. Таким образом, высыпание авроральных электронов породило СДВ-эффект, сопоставимый с суточным ходом обсуждаемых СДВ-параметров h(t) и R(t). Для таких ночСУХОВЕЙ и др.



**Рис. 8.** Следствие высыпания авроральных электронов ночью 28 сентября 1989 г., перед началом высыпания протонов 29 сентября 1989 г. 12 UT. Слева: динамика коэффициента отражения *R*. Справа: динамика эффективной высоты *h*. Сплошная кривая соответствует анализу в прямом направлении времени, штриховая — в обратном.



**Рис. 9.** Следствие высыпания ультра-релятивистских электронов днем 22 октября 1989 г., перед повторным увеличением потока протонов 22 октября 1989 г., 19 UT. Слева: динамика коэффициента отражения *R*. Справа: динамика эффективной высоты *h*.

ных вариаций требуются авроральные электроны с энергиями 1 МэВ [Chevalier et al., 2007].

Во время второго высыпания солнечных протонов 22 октября в 11 UT наблюдались аномальные вариации СДВ-сигналов, когда амплитуды и фазы всех трех монохроматических сигналов приблизительно синхронно уменьшились и восстанавливались (были качественно подобны). Такой СДВ-эффект для радиотрасс средней протяженности (~900 км) и наших рабочих частот является однозначным признаком высыпания ультра-энергичных релятивистских электронов (УРЭ) с энергией ~100 МэВ и выше [Remenets and Веloglazov, 2013]. Результаты решения обратной задачи для этого события во временном интервале с 11 до 13 UT изображены на рис. 9, где изображены вариации эффективной высоты h(t) и модуля коэффициента отражения R(t) в зависимости от времени UT. Эти результаты сшиваются с решением для этой же даты во временном интервале с 15 до 19 UT, представленном на рис. 6, а именно: значение эффективной высоты 48 км в 13 UT (после окончания высыпания УРЭ) согласуется со значением 51 км в 15 UT, значения коэффициента отражения отличаются на приемле-

мую величину (они равны 0.5 и 0.75 в 13 UT и 15 UT соответственно).

Как мы видим, эффективная высота во время высыпания УРЭ уменьшилась за 20 мин от 53 км до 35 км, значение коэффициента отражения уменьшилось от 0.5 до 0.4. Эффективная высота восстановилась до своего первоначального значения за 1.5–2 ч, коэффициент отражения за 40 мин (см. рис. 9). Таким образом, СДВ-эффект, создаваемый высыпанием УРЭ, значительно сильнее эффекта высыпания СКЛ, а именно, минимальная эффективная высота, полученная нами для обоих высыпаний СКЛ, равняется 48 и 49 км, соответственно (см. таблицы 1 и 2), а в данном случае высыпания УРЭ она оказалась на 13 и 14 км ниже.

За 8 часов до начала высыпания протонов 29 сентября произошло высыпание УРЭ, исследованное в работе [Remenets and Beloglazov, 1992]. Решение обратной задачи было получено в интервале с 4 до 10 UT, когда это высыпание УРЭ имело место, и в интервале с 12 до 21 UT, когда началось и продолжалось вторжение СКЛ в атмосферу. Минимальная эффективная высота во время высыпания УРЭ получилась равной 50 км с неопределенностью в 1–2 км. В нашем случае высыпания протонов (см. рис. 5) минимальное значение эффективной высоты получилось равным 49 км в 15 UT и близким к результату в 51 км из предшествующей публикации.

### 5. ВЫВОДЫ

Продолжая традицию своих предшественников по решения обратных СДВ-задач самосогласованным методом для всех типов геофизических возмущений, проявляющихся в вариациях СДВсигналов на радиотрассах приземного волновода, мы провели исследования нескольких типов возмущений, проявивших себя в сентябре-октябре 1989 г. Для них мы представили динамику отражательных свойств в полосе частот 10-14 кГи. Аналогичные исследования для представленных нами новых СДВ-возмущений в научной литературе отсутствуют, а именно: высыпание СКЛ с 19 по 23 октября 1989 г., высыпание ультра-энергичных релятивистских электронов с 11 до 13 UT 22 октября 1989 г., высыпание релятивистских электронов в ночных условиях с 19 до 22 UT 28 сентября 1989 г.

Высыпание протонов, начавшееся 29 сентября, было исследовано нами ранее [Remenets et al., 2020], что позволило нам сопоставить оба случая высыпания СКЛ между собой, привлекая для этого опубликованные спутниковые данные. Выходными данными названных обратных задач являются электрические свойства нижней кромки ионосферы в терминах комплексного коэффициента отражения R(t) и эффективной высоты волновода h(t) как функции времени, то есть динамика электрических свойств среды. Эффективную высоту можно считать аналогом центра тяжести твердого тела. Динамика последнего есть динамика самого тела. Динамика эффективной высоты отражает перемещение по высоте существенной для распространения СДВ нижней части ионосферного слоя, имеющей размер по высоте от нескольких до 20 км [Рыбачек, 1968]. Полученные нами результаты по высыпающимся протонам имеют еще следующую качественную особенность: наш анализ выполнен в условиях, когда одновременно работают две причины изменения электрических свойств ионосферы: высыпание СКЛ и изменение условий освешенности нижней кромки ионосферы на радиотрассе.

Представленные результаты еще раз раскрывают главный смысл слова "самосогласованный" в названии использованного метода решения обратной задачи. Алгоритм метода никак не привязан к природе конкретного геофизического возмущения и использует только вариации СДВ-величин.

Возвращаясь к протонным событиям и используя представленные для них количественные результаты, вернемся к их обсуждению в связи с бросающимся в глаза следующим обстоятельством. Первое протонное событие после своего максимума интенсивности было монотонно убывающим (рис. 3), а второе событие не было таковым (рис. 4). При этом экспериментальные СДВ-вариации в первом случае, сохраняли от суток к суткам качественное подобие, увеличивали размах своих изменений (квази-осцилляций). Во втором протонном событии это не так. Как видно из рис. 2 для данных от 20 и 23 октября амплитуды сигналов для трех частот в 2 раза меньше, чем в другие сутки и варьируются только на 20-30%. Обращаясь к решениям обратных задач для этих же календарных дат, представленных на рис. 6, мы видим, что модуль коэффициента отражения в 2 раза меньше, чем в остальные дни. Этот факт указывает на то, что 20 и 23 октября в энергетическом спектре сигнала присутствовала корпускулярная составляющая с такой плотностью потока, которой недостаточно, чтобы изменить эффективную высоту, но достаточно, чтобы породить поглощающий спорадический слой проводимости ниже 50 км. Последний уменьшает модуль коэффициента для 1-го скачка и "отключает" вклад 2-го ионосферного сигнала в амплитуду поля в точке приема.

Нами было показано, что минимальная эффективная высота во время потока СКЛ, начавшегося 29 сентября равнялась 49 км в начале и 53 км в конце переходных условий день/ночь. Эта же эффективная высота для 2-го возмущения, вызванного СКЛ и начавшегося 19 сентября, принимала значения 48 км в начале и 51 км в конце переходных условий день/ночь. Несмотря на различие значений плотности потока протонов с энергией E > 10 МэВ в 20 раз для указанных календарных дат, эффективные высоты в максимумах возмущений обоих событий отличаются на величину, соизмеримую с погрешностью метода анализа (3–4 км в возмущенных условиях).

При обсуждаемых плотностях потоков СКЛ мы могли ожидать, что происходит полное "запирание" электромагнитных волн в приземном волноводе между земной поверхностью и возмушенной нижней кромкой ионосферы, и что радиосигналы не чувствуют исчезновения регулярного *D*-слое ионосферы при пропадании освещения ее Солнцем. Описанный эффект решений обратных СДВ-задач говорит об обратном. Электромагнитные волны частично проникают на высоту *D*-слоя, свойства электронной проводимости которого зависят от зенитного угла Солнца. Более того, суточная вариация эффективной высоты h(t) не исчезает даже при максимальном из двух событий потоке протонов с энергией E > 10 MэB, который составлял  $2 \times 10^4$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup> 20 октября. Приращение эффективной высоты  $\Delta h$  при этом составило 3 км.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоглазов М.И., Ременец Г.Ф. Распространение сверхдлинных радиоволн в высоких широтах. Ленин-град: Наука, Ленинградское отделение, 240 с. 1982.

– Белоглазов М.И., Ременец Г.Ф. Нижняя ионосфера высоких широт и возможности диагностики условий распространения СДВ (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 5. С. 705–718. 1990.

- Гюннинен Э.М., Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных импульсов и их гармонических составляющих над земной поверхностью / Проблемы дифракции и распространения волн: ЛГУ, Вып. 3. С. 5–191. 1964.

- Гюннинен Э.М., Забавина И.Н. Распространение длинных радиоволн над земной поверхностью / Проблемы дифракции и распространения волн: ЛГУ, Вып. 5. С. 5–30. 1966.

— Макаров Г.И., Новиков В.В. Распространение электромагнитных волн в импедансных плоском и сферическом волноводах. Ч. І и ІІ. / Проблемы дифракции и распространения волн. Вып. 7. С. 19–33, 34–65. 1978.

- Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. Ред. М.И. Пудовкин. М.: Наука, 198 с. 1991.

– *Ременец Г.Ф., Белоглазов М.И*. Предварительный анализ динамики свойств нижней ионосферы на заходе солнца для авроральной трассы (по СДВ данным) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 1. С. 69–72. 1982.

- Ременец Г.Ф., Белоглазов М.И. Отражательные свойства нижней полярной ионосферы, особенности возбуждения и распространения СДВ в высоких широтах // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 28. № 12. С.1491–1504. 1985.

– Ременец Г.Ф., Белоглазов М.И., Тамкун Л.Г. Модифицированный метод анализа СДВ-аномалий и динамика нижней кромки ионосферы во время ППШ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 29. № 1. С. 45–50. 1989.

*— Рыбачек С.Т.* Распространение СДВ в волноводном канале Земля — ионосфера // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 8. № 3. С. 443–500. 1968.

- Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Советское радио, 520 с. 1970.

- Beloglazov M.I., Remenets G.F. Investigation of powerful VLF disturbances // Intern. Journ. Geomagn. Aeronom. V. 5. № 3. GI3004. 2005.

https://doi.org/10.1029/2005GI000101

- Bremmer H. Terrestrial Radio Wave: Theory of Propagation. Amsterdam: Elsevier Sci. Ltd. 343 p. 1949.

- Gordon C.W., Canuto V., Axford W.I. Handbook of Astronomy, Astrophysics and Geophysics. V. 1: The Earth. 1. The Upper Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere. London: Gordon and Breach. P. 276–277. 1978.

- *Chevalier M.V., Peter W.B., Inan U.S. et al.* Remote sensing of ionospheric disturbances associated with energetic particle precipitation using the South Pole VLF beacon // J. Geophys. Res. V. 112. A11306. 2007. https://doi.org/10.1029/2007JA012425

*– Field E.C., Warren R.E., Warber C.R.* Calculation of ionospheric conductivity profiles by inverting VLF/LF reflection data: 1. Isotropic propagation // Radio. Sci. V. 18. № 3. P. 452–460. 1983.

https://doi.org/10.1029/RS018I003P00452

- *Helms W.J., Swarm H.M.* VLF step frequency sounding of the polar lower ionosphere // J. Geophys. Res. V. 74. № 26. P. 6341–6351. 1969.

https://doi.org/10.1029/JA074I026P06341

- Miroshnichenko L. I., De Koning C.A., Perez-Enriques R. Large solar event of September 29, 1989: ten years after // Space Sci. Rev. V. 91. № 3. P. 615–715. 2000. https://doi.org/10.1023/A:1005279108725

- Ondrášková A., Krivolutsky A., Laš tovič ka J. Changes of the neutral and ionized composition in the D-region after solar proton event in October 1989 (model simulations) // Adv. Space Res. V. 31. № 9. P. 2169–2176. 2003. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00130-3

- *Remenets G.F., Beloglazov M.I.* Dynamics of an auroral low ionospheric fringe at geophysical disturbances on 29 September 1989 // Planet. Space Sci. V. 40. P. 1101–1108. 1992.

https://doi.org/10.1016/0032-0633(92)90039-Q

- *Remenets G.F., Beloglazov M.I.* Ultrarelativistic electrons in the near cosmos and X-ray aurora in the middle polar atmosphere // J. Geophys. Res. Space. V. 118. № 11. P. 6829–6838. 2013.

https://doi.org/10.1002/2013JA018822

- *Remenets G.F., Suhovey M.I., Shishaev V.A.* Sunset variations of the bottom edge of the ionosphere during the proton precipitations on and after 29 September 1989 / Proc. XII Int. Con. and School/Problems of Geocosmos-2018. P. 319-332. 2020.