
**АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ
ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ВРЕМЕНАМИ ЖИЗНИ 1–15 МИНУТ
ПО ДАННЫМ СКОРОСТНОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА ИСЗФ СО РАН**

**AUTOMATIC ESTIMATION OF DYNAMICS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES
WITH 1–15 MINUTE LIFETIMES AS DERIVED FROM ISTEP SB RAS FAST CHIRP-
IONOSONDE DATA**

О.И. Бернгардт*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, berng@iszf.irk.ru***Т.В. Бубнова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, btv@iszf.irk.ru***А.В. Подлесный***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pav1986@rambler.ru***O.I. Berngardt***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, berng@iszf.irk.ru***T.V. Bubnova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, btv@iszf.irk.ru***A.V. Podlesnyi***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pav1986@rambler.ru*

Аннотация. В работе предложен и апробирован метод анализа ионограмм вертикального зондирования, основанный на выделении отклонений формы ионограммы от ее регулярного (усредненного) вида. Отклонения ионограмм от усредненного вида интерпретируются нами в терминах отражения от неоднородностей электронной концентрации на высотах, соответствующих действующей высоте. Обнаруженные таким образом неоднородности исследуются в рамках модели локализованной, равномерно движущейся неоднородности, при этом определяются их характерные параметры: действующие высоты и наблюдаемые вертикальные скорости. Был проведен анализ выборочных экспериментальных данных, соответствующих трем сезонам (весна, зима, осень), полученных в течение 2013–2015 гг. вблизи Иркутска с помощью скоростного ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН. Анализ шести дней наблюдений для этих сезонов показал, что в наблюдаемой вертикальной скорости этих неоднородностей в это время можно выделить два характерных распределения: широкое распределение скоростей вблизи 0 м/с со среднеквадратичным отклонением порядка 250 м/с и узкое распределение скоростей вблизи –160 м/с. Показана эффективность предложенного алгоритма для автоматического анализа данных вертикального зондирования с высокой частотой повторений.

Ключевые слова: ионосферные неоднородности, автоматическая обработка ионограмм, вертикальное зондирование ионосферы.

Abstract. We propose and test a method of analyzing ionograms of vertical sounding, which is based on detecting deviations of the shape of an ionogram from its regular (averaged) shape. We interpret these deviations in terms of reflection from electron density irregularities at heights corresponding to the effective height. We examine the irregularities thus discovered within the framework of a model of a localized uniformly moving irregularity, and determine their characteristic parameters: effective heights and observed vertical velocities. We analyze selected experimental data for three seasons (spring, winter, autumn) obtained nearby Irkutsk with a ISTEP SB RAS fast chirp ionosonde in 2013–2015. The analysis of six days of observations conducted in these seasons has shown that in the observed vertical drift of the irregularities there are two characteristic distributions: wide velocity distribution with nearly 0 m/s mean and with standard deviation of ~250 m/s and narrow distribution with nearly –160 m/s mean. The analysis has demonstrated the effectiveness of the proposed algorithm for the automatic analysis of vertical sounding data with high repetition rate.

Keywords: ionospheric disturbances, automatic ionogram processing, ionospheric vertical sounding.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферная плазма — высокодинамичная среда, в которой присутствуют естественные неоднородности различных масштабов и видов — от сан-

тиметровых тепловых неоднородностей, используемых для диагностики плазмы методом некогерентного рассеяния, до суточных вариаций, связанных с вращением Земли вокруг своей оси. Исследование ионосферных неоднородностей с временами жизни

от минуты и более ведется достаточно давно различными методами и с помощью различных инструментов: сетей GPS/ГЛОНАСС, ионозондов и их сетей, спутников и радаров.

К основным механизмам формирования крупномасштабных неоднородностей с периодами десятки минут и более можно отнести внутренние атмосферные волны, распространяющиеся от различных источников в основном в горизонтальном направлении [Hocke, Schlegel, 1996; Frissell et al., 2016].

Неоднородности с периодами 1–15 мин изучены слабее и в настоящее время активно исследуются [Kozlovsky et al., 2013]. Иногда эти неоднородности связаны с акустическими волнами от различных мощных источников и могут распространяться от источника как в горизонтальном [Bergardt et al., 2015a], так и в вертикальном [Maruyama et al., 2016a, 2016b; Bergardt et al., 2015b, 2017] направлении.

Исследование ионосферы с помощью ионозондов проводятся очень давно. Отработаны регулярные 15-минутные режимы функционирования мировой сети ионозондов, создаются сети ионозондов различных типов — как с импульсным [Reinisch et al., 2009], так и с непрерывным излучением сигнала (см., например, [Ponyatov et al., 1999; Uryadov et al., 2004] и ссылки в них). Долговременные ионозондовые измерения составляют базу для создания современных моделей ионосферной плазмы на высотах ниже максимума F2-слоя и используются при построении моделей, корректируемых в реальном масштабе времени [Bilitza et al., 2017; Pignalberi et al., 2018], а также выборочных [Liu et al., 2011; Maruyama et al., 2011, 2016a, 2016b; Bergardt et al., 2015b] и статистических исследований ионосферных неоднородностей [Kurkin et al., 2014; Bergardt et al., 2017; Givishvili, Leshchenko, 2017].

Развитие ионозондов, наблюдающееся в последние несколько лет, связано, в частности, с развитием методов цифрового формирования излучаемых сигналов и прямого цифрового приема принимаемых сигналов. Это существенно упростило создание высокоскоростных ионозондов, работающих с повышенным временным разрешением (1 мин и менее). Повышение временной детализации ионосферных процессов показало значительную долю короткоживущих неоднородностей в ионосфере и выявило существенные сложности интерпретации получаемых ионограмм. Сложность интерпретации ионограмм и большой поток данных стимулируют разработку методов обработки ионограмм, ориентированных скорее на выявление неоднородностей различных масштабов и определение их характеристик, чем на решение задачи восстановления высотного профиля электронной концентрации [Haldoupis et al., 2006; Jiang et al., 2015]. Далее в работе мы будем использовать близкий подход.

Проявления единичных неоднородностей на одиночном ионозонде часто имеют похожую форму [Lobb, Titheridge, 1977; Голикова и др., 2005; Kurkin et al., 2014] и отличаются в основном длительностью наблюдения эффекта и наблюдаемой вертикальной

скоростью перемещения возмущения по ионограмме. Наблюдаемая вертикальная скорость связана не только с групповой или фазовой скоростью неоднородности, но и с направлением движения, а также с отличием реальной высоты, на которой существует неоднородность, от действующей высоты, измеряемой ионозондом.

Далее в работе мы будем рассматривать неоднородности, проявляющиеся в виде существенных быстроживущих дополнительных треков на ионограммах или существенных искажений основного трека, характерное время жизни которых (т. е. время, в течение которого возмущение трека можно считать не меняющим своей формы и высоты) составляет 1–15 мин.

В данной работе предложен и апробирован метод анализа ионограмм вертикального зондирования, основанный на выделении отклонений формы ионограммы от ее регулярного (усредненного за 15 мин) вида. Повышенное временное разрешение ионозонда позволяет считать фоновую ионосферу на периоде усреднения стационарной и устойчиво выделять на ионограммах следы от ионосферных неоднородностей с временами жизни 1–15 мин. На основе предложенного метода по данным быстрого ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН, расположенного вблизи г. Иркутска [Подлесный, 2017; Науменко, Подлесный, 2017], нами получена статистика распределения неоднородностей по наблюдаемым скоростям для данного региона, показано, что существует заметное количество неоднородностей с характерными временами жизни 1–15 мин, движущихся вниз с характерной наблюдаемой вертикальной скоростью порядка 160 м/с, и эта скорость в первом приближении не зависит от сезона.

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ КОРотКОЖИВУЩИХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ИОНОГРАММАМ

Основу предлагаемого метода обработки составляет выделение некоей средней формы ионограммы за период усреднения (далее в работе 15 и 30 мин), включающей в себя особенности, время жизни которых порядка и более указанного периода. К таким особенностям могут относиться как регулярные особенности ионограммы, связанные с хорошо изученным отражением от плавно-неоднородного слоя, так и нерегулярные особенности ионосферной плазмы с временем жизни, сравнимым с периодом усреднения (кратные отражения от ионосферы, рассеяние на спорадических долгоживущих структурах — F-рассеяние, рассеяние на спорадическом E-слое и т. д.).

Для удаления медленноживущих (квазистационарных) эффектов используется двухэтапная фильтрация. Исходная ионограмма $A_t(f, h_{\text{eff}})$, снятая в момент времени t , представляет собой зависимость амплитуды A от действующей высоты h_{eff} (групповой задержки) принятых (отраженных и рассеянных

ных) сигналов и от частоты зондирования f . При анализе она представляется в виде матрицы, по вертикальной оси которой откладывается групповая задержка сигнала (действующая высота отражения h_{eff}), по горизонтальной оси — зондирующая частота сигнала f , а в ячейках — амплитуда принятого сигнала A . Шаг исходной матрицы по частоте составляет 0.02 МГц, а шаг по высоте — 1.2 км. Ионограммы регистрируются 1 раз в минуту, позволяя получать последовательность из 1440 матриц (ионограмм) в сутки.

Характерным временным масштабом регулярных ионосферных изменений являются периоды порядка 15 мин. Это временное разрешение лежит в основе функционирования большинства ионозондов и их сетей. Поэтому усредненную за 15 мин ионограмму можно считать отражающей результат зондирования фоновой невозмущенной ионосферы. Существенные отклонения каждой ионограммы от такой «средней» ионограммы мы будем связывать с быстроживущими (или перемещающимися) ионосферными неоднородностями различной природы. Для их выделения будем использовать фильтрацию последовательности ионограмм.

На первом этапе фильтрации по исходной ионограмме строится маска стационарной ионограммы со временем стационарности 5 мин, чтобы оставить только быстроживущие детали, включающие в себя как неоднородности, так и шум. Построение маски ведется на сетке с шагом 0.1 МГц по частоте и 10 км по высоте. Маска строится следующим образом. Каждый элемент маски устанавливается равным единице, если внутри этого элемента есть хотя бы одна точка ионограммы со значимой амплитудой (превышающей средний уровень радишума в полосе приемника, оцененный на этапе первичной обработки). Если в k из m случаев (3 из 5) этот элемент маски остается равным 1, то все части ионограммы, которые покрывает элемент, в итоговой ионограмме зануляются, тем самым удаляются постоянные треки на ионограмме. Качественные оценки показывают, что такая фильтрация соответствует удалению отражений от неоднородностей, перемещающихся с вертикальными фазовыми скоростями менее 30 м/с.

На втором этапе из ионограммы, получившейся на первом этапе, удаляется точечный шум. Этот этап фильтрации ионограммы производится по принципу клеточного автомата [Toffoli, Margolus, 1987].

Из ионограммы удаляются все шумовые точки, которые не являются центрами областей точек со значимой амплитудой. Точка ионограммы считается регулярным сигналом и далее рассматривается при анализе неоднородностей, если в соседних восьми узлах и в самой центральной ячейке значимая амплитуда фиксируется более трех раз. В противном случае (значимая амплитуда фиксируется менее чем у трех соседей) эта точка считается шумом и ее значение не рассматривается при анализе неоднородностей.

В результате проведенной двухэтапной фильтрации получаемые ионограммы $\tilde{A}_t(f, h_{\text{eff}})$ содержат лишь быстроживущие вариации без постоянных или

шумовых следов. Интегрирование полученной ионограммы по частоте для каждого значения высоты позволяет оценить высоты, на которых наблюдаются неоднородности в данный момент времени.

На рис. 1 приведены результаты зондирования 01.01.2015 по данным скоростного ЛЧМ-ионозонда вертикального зондирования (Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН, п. Торы) в период с 05:40 по 05:47 UT. Видно (рис. 1) вертикальное перемещение ионосферной неоднородности, обведенной на рисунке штриховой линией.

На рис. 2 приведены ионограммы, полученные с применением изложенного выше алгоритма фильтрации к ионограммам рис. 1. Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что фильтрация действительно эффективно удаляет регулярные треки, оставляя неизменными быстроменяющиеся треки, соответствующие перемещающимся неоднородностям (05:40–05:47 UT).

Для дальнейшего анализа нами использовались карты интегральной амплитуды $B(h_{\text{eff}}, t)$ в пределах полосы анализа ионограммы $[f_{\text{min}}, f_{\text{max}}]$:

$$B(h_{\text{eff}}, t) = \frac{1}{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}} \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} \tilde{A}_t(f, h_{\text{eff}}) df. \quad (1)$$

Анализ карт интегральной амплитуды $B(h_{\text{eff}}, t)$ позволяет выделить высоты, на которых амплитуда сигнала, отраженного от ионосферной неоднородности, максимальна. Считая, что положение максимумов интегральной амплитуды $B(h_{\text{eff}}, t)$ соответствует действующей высоте и моменту появления неоднородностей, можно провести их качественный анализ.

Методика выделения неоднородностей была апробирована на данных трех сезонов, исключая летний (суммарно 32 дня): 13–15.02.13, 15–17.04.13, 19–21.04.13, 23–25.05.13, 23–25.09.13, 24–26.10.13, 24–26.04.15, 11–13.05.15, 13–15.11.15, 06–08.12.15. На рис. 3, *a–e* показаны карты интегральной амплитуды $B(h_{\text{eff}}, t)$ для разных сезонов, выделенные из ионограмм. Качественный анализ показал, что наблюдаемые неоднородности существенно различаются по временам жизни. Предварительный анализ показал, что неоднородности можно подразделить на изолированные (область II на рис. 3, *б*) и квазипериодические (область I на рис. 3, *б*) возмущения. Примеры квазипериодической и изолированной ионосферной неоднородности приведены на рис. 3, *ж*, *з* соответственно.

НАБЛЮДАЕМАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Одним из очевидных параметров, которые можно оценить по подобным ионограммам, является наблюдаемая вертикальная скорость перемещения неоднородностей. Очевидно, что определение скорости, как и определение высоты неоднородности, — операция неточная, особенно на больших высотах, где групповая задержка сигнала не пропорциональна высоте. Кроме того, рассчитываемая скорость существенно отличается и от групповой скорости неодно-

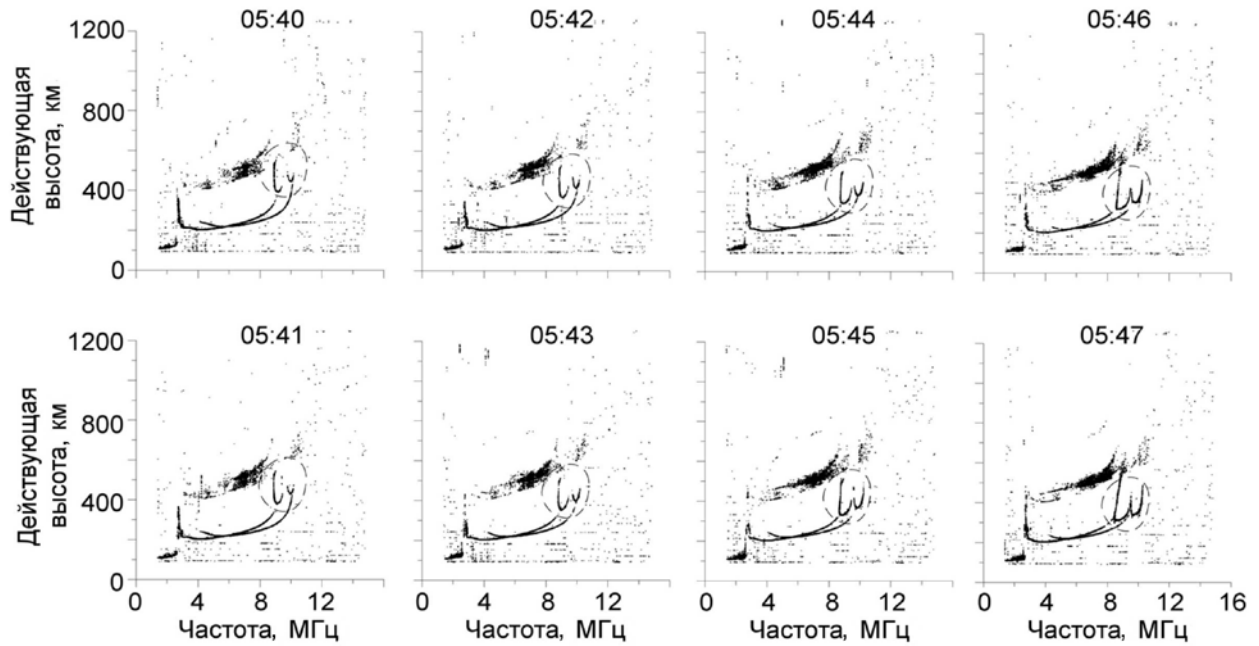


Рис. 1. Ионограммы, полученные с помощью ЛЧМ-ионозонда вертикального зондирования (Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН, п. Торы) в период с 05:40 по 05:47 UT 01.01.2015 в присутствии ионосферной неоднородности (отмечена штриховой линией)

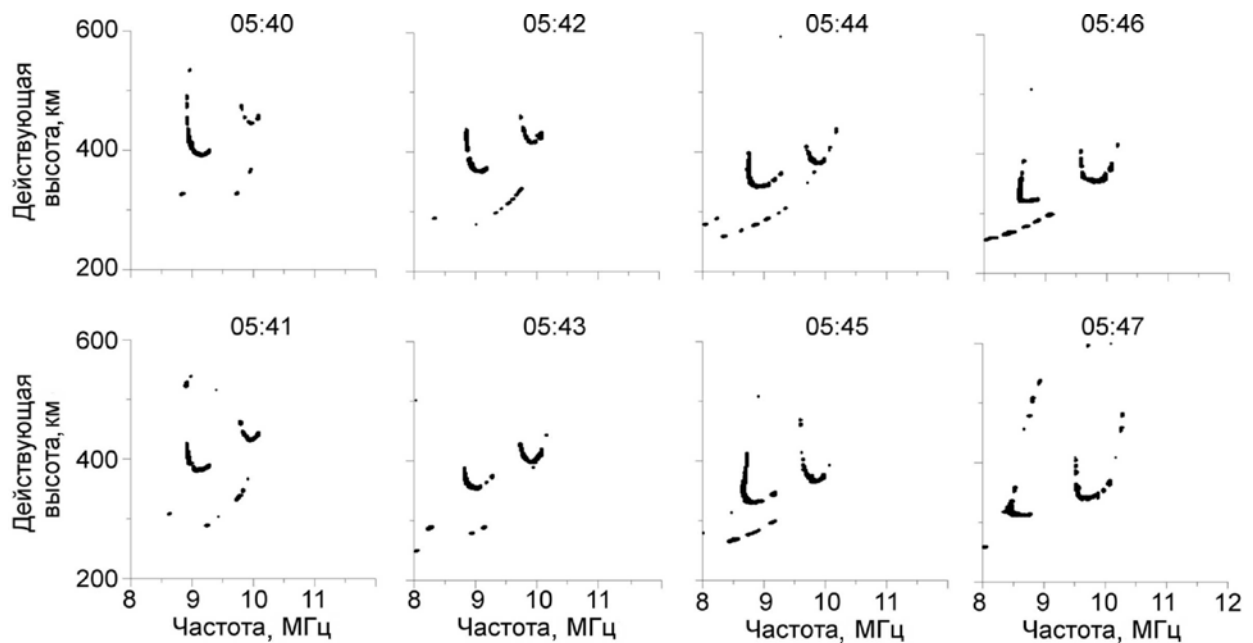


Рис. 2. Ионограммы, полученные после фильтрации ионограмм на рис. 1

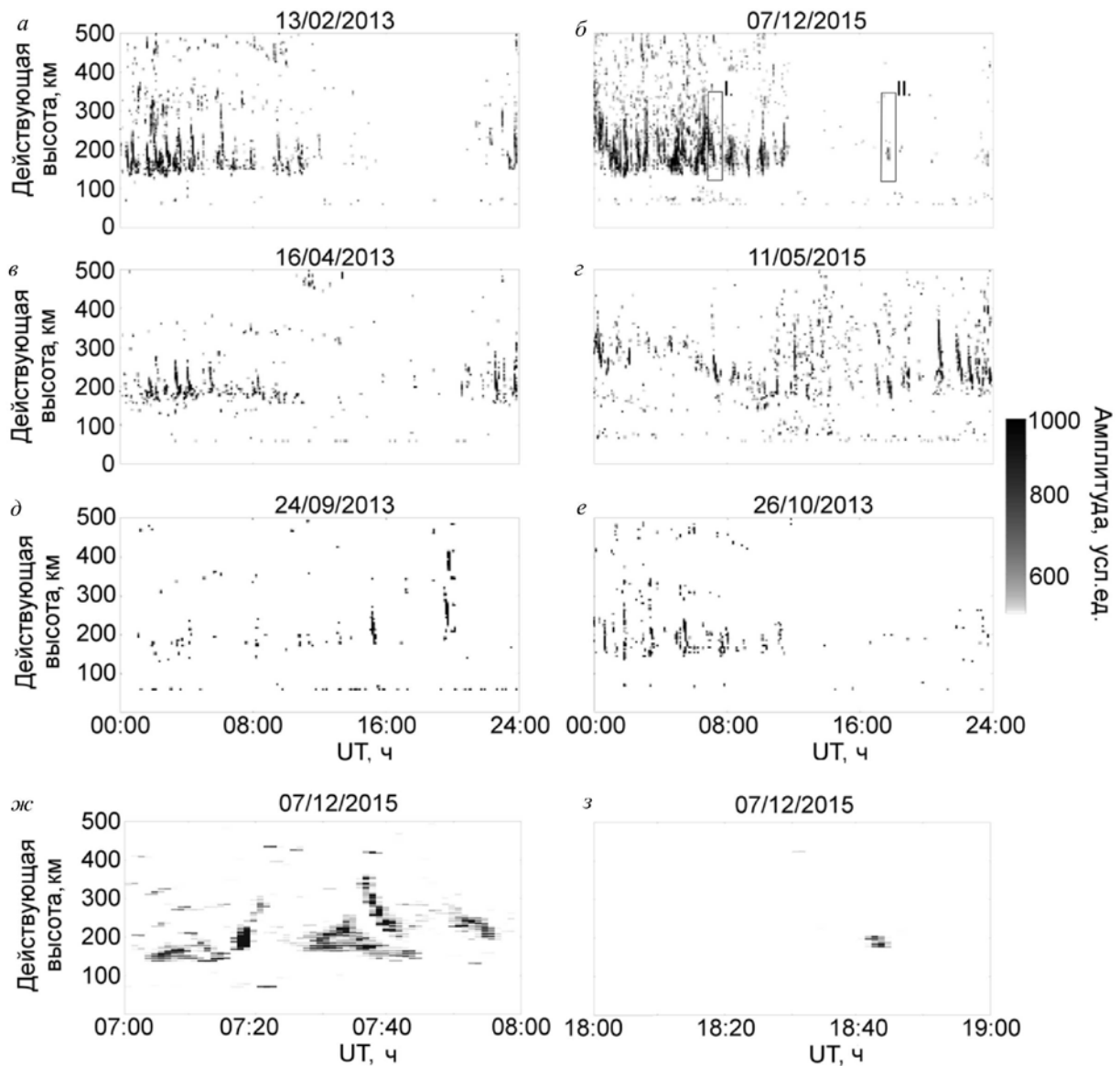


Рис. 3. Проявление ионосферных неоднородностей на суточных ионограммах в разные сезоны: а, б — зимний (13.02.13, 07.12.15); в, г — весенний (16.04.13, 11.05.15); д, е — осенний (24.09.13, 26.10.13); области I и II на панели б — квазипериодические и изолированные возмущения соответственно. Примеры различных типов возмущений: ж — квазипериодическое возмущение (область I на панели б); з — изолированное возмущение (область II на панели б)

родностей в случае их невертикального движения, и от фазовой скорости в вертикальном направлении вследствие того, что при анализе рассматривается действующая высота отражения радиоволны, а не реальная. Однако для качественной оценки динамики неоднородностей в первом приближении исследование таких наблюдаемых вертикальных скоростей имеет смысл.

Карты интегральной амплитуды используются нами для детектирования неоднородностей и определения параметров их движения. Считая, что наблюдаемая вертикальная скорость постоянна, можно оценить эти параметры.

Полагая неоднородность в период $[T_0, T_0 + \Delta T_0]$ локализованной по высоте и единственной, скорость V_0 и начальную высоту неоднородности $h_{\text{eff},0}$ можно определить из условия максимума функционала:

$$\Omega(T_0) = \frac{1}{\Delta T_0} \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T_0} B(h_{\text{eff},0} + V_0(t - T_0), t) dt = \max. \quad (2)$$

Средний момент наблюдения неоднородности

$$T_1 = \frac{\int_{T_0}^{T_0 + \Delta T_0} B(h_{\text{eff},0} + V_0(t - T_0), t) t dt}{\int_{T_0}^{T_0 + \Delta T_0} B(h_{\text{eff},0} + V_0(t - T_0), t) dt} \quad (3)$$

и время жизни неоднородности

$$\Delta T = \sqrt{\frac{\int_{T_0}^{T_0 + \Delta T_0} B(h_{\text{eff},0} + V_0(t - T_0), t) (t - T_1)^2 dt}{\int_{T_0}^{T_0 + \Delta T_0} B(h_{\text{eff},0} + V_0(t - T_0), t) dt}} \quad (4)$$

определяются стандартными статистическими моментами. На рис. 4 приведен пример тестирования

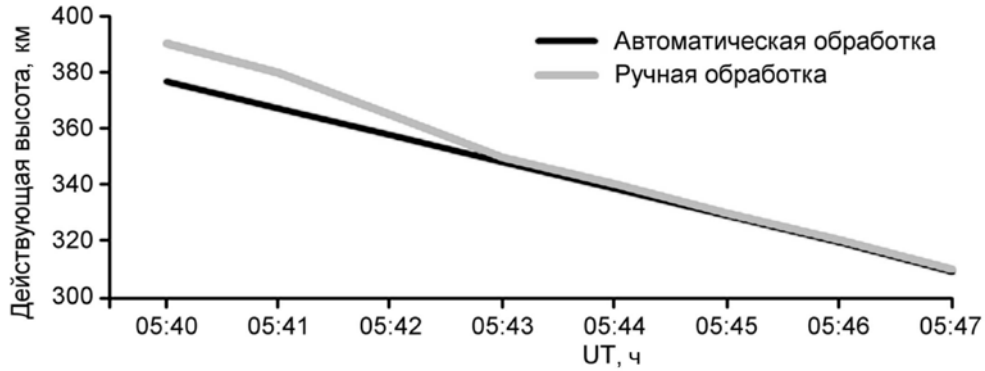


Рис. 4. Динамика действующей высоты отражения от неоднородности как функция времени 01.01.2015, полученная в результате ручной (серая линия) и автоматической (черная линия) обработки

методики на последовательности ионограмм, обработанных как вручную, так и автоматически, с помощью изложенного алгоритма. Видно (рис. 4), что перемещение неоднородности нелинейно — в верхней части скорость выше, чем в нижней. Это связано с тем, что при равномерном вертикальном движении неоднородности в области максимума F2-слоя групповая задержка (действующая высота) растет с высотой нелинейно. Тем не менее в нижней части ионосферы (где действующая высота на ионограмме примерно равна реальной высоте отражения, а наблюдаемая скорость эквивалентна фазовой скорости в вертикальном направлении) можно счи-

тать наблюдаемую скорость неоднородности в первом приближении равномерной и учитывать неравномерность наблюдаемой скорости на больших высотах только в качестве поправки второго порядка.

Для исследования распределения наблюдаемых вертикальных скоростей неоднородностей нами была проведена автоматическая обработка шести дней для трех сезонов, по два дня зимы (13.02.13, 07.12.15), весны (16.04.13, 11.05.15) и осени (24.09.13, 26.10.13). Результаты этой обработки приведены на рис. 5.

Как видно из распределения скоростей в указанные дни, существуют два отчетливо различающихся

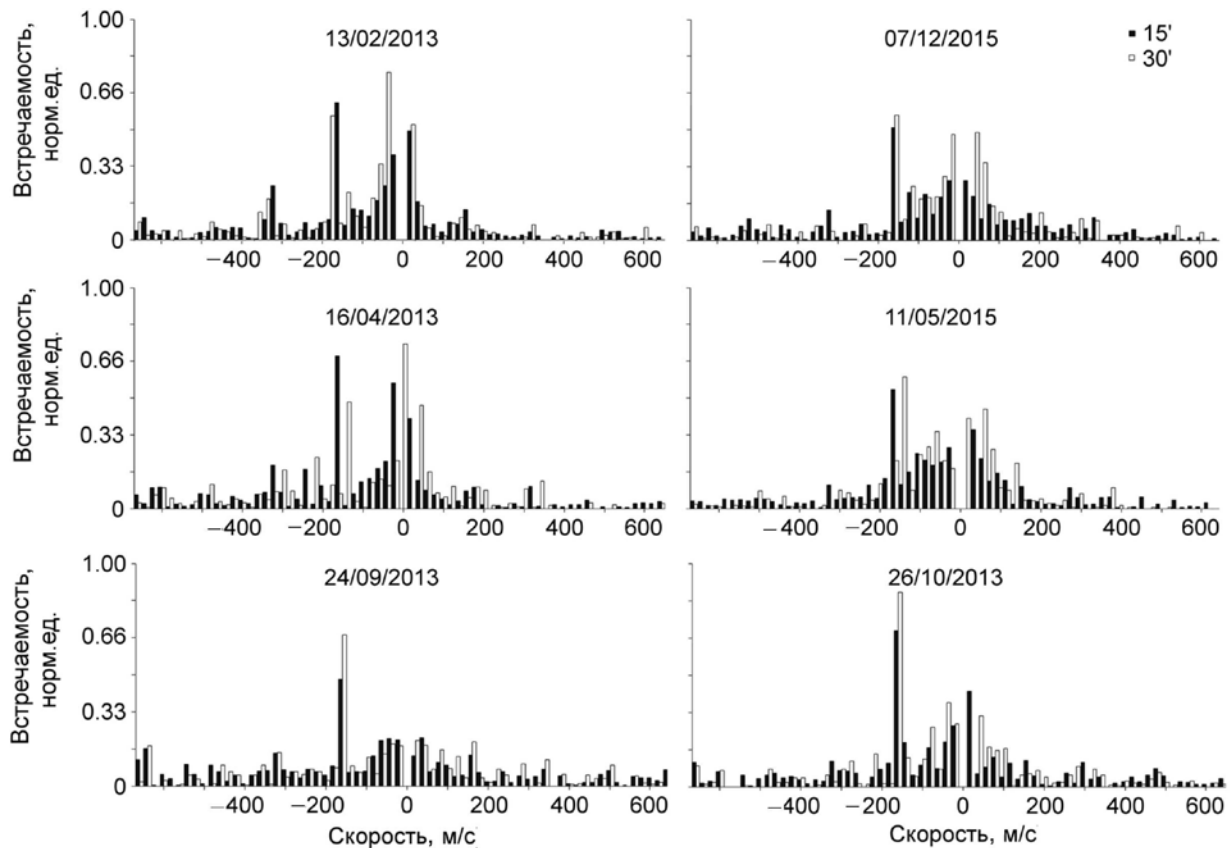


Рис. 5. Распределение неоднородностей по наблюдаемым вертикальным скоростям в различные дни по сезонам: зимой (13.02.13, 07.12.15), весной (16.04.13, 11.05.15) и осенью (24.09.13, 26.10.13). Цвета соответствуют окнам фильтрации: черный — 15 мин; серый — 30 мин

Статистические параметры распределения скоростей после удаления пика на -160 м/с в различные дни

Дата	Окно 30 мин, средняя скорость, м/с	Окно 30 мин, среднекв. откло- нение скорости, м/с	Окно 15 мин, средняя скорость, м/с	Окно 15 мин, среднекв. откло- нение скорости, м/с
13.02.13	-67.8	234.8	-76.3	264.7
07.12.15	-15.6	225.5	-27.8	283.8
16.04.13	-89.6	249.8	-89.5	275.5
11.05.15	-59.8	184.4	-50.2	246.5
24.09.13	-30.3	306.2	-62.7	339.1
26.10.13	-33.1	261.5	-33.3	299.1

распределения, характерные для всех сезонов, — широкое распределение скоростей вблизи 0 м/с со среднеквадратичным отклонением порядка 250 м/с и узкое распределение скоростей вблизи -160 м/с. Качественный анализ ионограмм подтверждает наличие большого числа неоднородностей, движущихся вниз с близкими наблюдаемыми вертикальными скоростями (см. рис. 1). Для выяснения причин наблюдаемого эффекта нами было проведено сравнение распределений наблюдаемых скоростей неоднородностей при двух различных максимальных временах жизни ΔT_0 — 30 и 15 мин. Результаты сравнения приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что форма распределений в основном не связана с максимальным временем жизни, используемым при оценке скорости предложенным нами методом. По-видимому, наблюдаемые особенности распределения носят объективный характер и соответствуют вертикальным фазовым скоростям движения неоднородностей.

Из рис. 5 видно, что выделенная скорость -160 м/с имеет достаточно узкое распределение шириной порядка 10 – 20 м/с. Широкое распределение скоростей обладает средним смещением порядка -50 ... -60 м/с и среднеквадратичным отклонением порядка 240 – 290 м/с. Малость среднего значения по сравнению со среднеквадратичным отклонением позволяет в первом приближении считать это распределение симметричным с нулевым средним и со среднеквадратичным отклонением порядка 250 м/с. Результаты статистической обработки широкого пика (после удаления узкого пика на -160 м/с) для каждого из рассмотренных дней приведены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан алгоритм определения по ионограммам наблюдаемой вертикальной скорости ионосферных неоднородностей с характерными временами жизни 1 – 15 мин. Алгоритм заключается в удалении долгоживущих (квазистационарных) следов из ионограмм и анализе быстроменяющихся эффектов. Интегральная оценка амплитуды, используемая в алгоритме и представляющая собой интегрирование отфильтрованной ионограммы по частоте, позволяет оценивать наблюдаемую вертикальную скорость неоднородностей, которую в первом приближении, по-видимому, можно интерпретировать как их вертикальную фазовую скорость. Анализ ше-

сти дней наблюдений в разные сезоны (весна, зима, осень) показал, что в наблюдаемой вертикальной скорости неоднородностей вблизи Иркутска можно выделить два характерных распределения: широкое распределение скоростей вблизи 0 м/с со среднеквадратичным отклонением порядка 250 м/с и узкое распределение скоростей вблизи -160 м/с. Алгоритм реализован для ионограмм, полученных с помощью скоростного ЛЧМ-иозонда вертикального зондирования ИСЗФ СО РАН, и может использоваться для анализа данных других высокоскоростных иозондов.

Данные, использованные в работе, получены на скоростном ЛЧМ-иозонде вертикального зондирования ИСЗФ СО РАН (Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН, п. Торы), входящем в Центр коллективного пользования «Ангара», в рамках выполнения проекта П.12.2.3 Программы ФНИ государственных академий на 2013 – 2020 гг. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ — Иркутская область # 17 - 45 - 388072 p_a. Авторы благодарны анонимным рецензентам за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голикова Е.В., Куницын В.Е., Матвеев А.С., Нестеров И.А. Моделирование отражения радиосигналов от слоистой атмосферы и ионосферы // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, № 7. С. 794–804.
- Науменко А.А., Подлесный А.В. Модернизация передающего и приемного оборудования сети ЛЧМ-зондирования // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. XV Конференция молодых ученых: труды. 2017. С. 279–281.
- Подлесный А.В. ЛЧМ-приемник с использованием программно-определяемых систем // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. XV Конференция молодых ученых: труды. 2017. С. 200–202.
- Bergardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynina A.A., et al. Toward the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of “Chelyabinsk” meteorite fall according to the data from coherent radar, GPS, and seismic networks // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015a. V. 120, N 12. P. 10,754–10,771. DOI: [10.1002/2015JA021549](https://doi.org/10.1002/2015JA021549).
- Bergardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyi A.V. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20 UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015b. V. 132. P. 106–115. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.004).

Berngardt O.I., Perevalova N.P., Podlesnyy A.V., et al. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016 // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122, N 4. P. 4736–4754. DOI: [10.1002/2016JA023511](https://doi.org/10.1002/2016JA023511).

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather*. 2017. V. 15, N 2. P. 418–429. DOI: [10.1002/2016sw001593](https://doi.org/10.1002/2016sw001593).

Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., et al. Sources and characteristics of medium scale traveling ionospheric disturbances observed by high frequency radars in the North American sector // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, N 4. P. 3722–3739. DOI: [10.1002/2015ja022168](https://doi.org/10.1002/2015ja022168).

Givishvili G.V., Leshchenko L.N. Spatiotemporal parameters of anomalous reflections from the ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017. V. 57, N 4. P. 434–441. DOI: [10.1134/S0016793217040077](https://doi.org/10.1134/S0016793217040077).

Haldoupis C.I., Meek C., Christakis N., et al. Ionogram height–time–intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68, N 3–5. P. 539–557. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.03.020).

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Ann. Geophys.* 1996. V. 14, N 9. P. 917–940. DOI: [10.1007/s00585-996-0917-6](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0917-6).

Jiang Chunhua, Yuannong Zhang, Guobin Yang, et al. Automatic scaling of the sporadic E layer and removal of its multiple reflection and backscatter echoes for vertical incidence ionograms // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 129, Suppl. C. P. 41–48. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.04.005).

Kozlovsky A., Turunen T., Ulich T. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auroral ionosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, N 8. P. 5265–5276. DOI: [10.1002/jgra.50474](https://doi.org/10.1002/jgra.50474).

Kurkin V.I., Laryunin O.A., Podlesnyy A.V., et al. Studying morphological characteristics of traveling ionospheric disturbances with the use of near-vertical ionospheric sounding data // *Atmos. and Ocean. Optics*. 2014. V. 27, N 4. P. 303–309. DOI: [10.1134/S1024856014040095](https://doi.org/10.1134/S1024856014040095).

Liu J.-Y., Chen Ch.-H., Lin Ch.-H., et al. Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2011. V. 116, N A6, A06319. DOI: [10.1029/2011ja016761](https://doi.org/10.1029/2011ja016761).

Lobb R.J., Titheridge J.E. The effects of travelling ionospheric disturbances on ionograms // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1977. V. 39. P. 129–138. DOI: [10.1016/0021-9169\(77\)90106-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(77)90106-4).

Maruyama T., Tsugawa T., Kato H., et al. Ionospheric multiple stratifications and irregularities induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth, Planets, and Space*. 2011. V. 63. P. 869–873. DOI: [10.5047/eps.2011.06.008](https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.008).

Maruyama T., Yusupov K., Akchurin A. Interpretation of deformed ionograms induced by vertical ground motion of seismic Rayleigh waves and infrasound in the thermosphere // *Ann. Geophys.* 2016a. V. 34, N 2. P. 271–278. DOI: [10.5194/angeo-34-271-2016](https://doi.org/10.5194/angeo-34-271-2016).

Maruyama T., Yusupov K., Akchurin A. Ionosonde tracking of infrasound wavefronts in the thermosphere launched by seismic waves after the 2010 M8.8 Chile earthquake // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016b. V. 121, N 3. P. 2683–2692. DOI: [10.1002/2015ja022260](https://doi.org/10.1002/2015ja022260).

Pignalleri A., Pezzopane M., Rizzi R., Galkin I.A. Effective solar indices for ionospheric modeling: a review and a proposal for a real-time regional IRI // *Surv. Geophys.* 2018. V. 39, N 1. P. 125–167. DOI: [10.1007/s10712-017-9438-y](https://doi.org/10.1007/s10712-017-9438-y).

Ponyatov A.A., Uryadov V.P., Ivanov V.A., et al. Oblique chirp sounding of the modified ionosphere. Experiment and simulation // *Radiophys. Quant. Electron.* 1999. V. 42, N 4. P. 269–277. DOI: [10.1007/bf02677569](https://doi.org/10.1007/bf02677569).

Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G.M. New digisonde for research and monitoring applications // *Radio Sci.* 2009. V. 44, N 1. RS0A24. DOI: [10.1029/2008rs004115](https://doi.org/10.1029/2008rs004115).

Toffoli T., Margolis N. Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling. Cambridge, MIT Press, 1987. 276 p.

Uryadov V.P., Kurkin V.I., Vertogradov G.G., et al. Features of propagation of HF signals on mid-latitude paths under conditions of geomagnetic disturbances // *Radiophys. Quant. Electron.* 2004. V. 47, N 12. P. 933–946. DOI: [10.1007/s11141-005-0035-4](https://doi.org/10.1007/s11141-005-0035-4).

REFERENCES

Berngardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynina A.A., Kutelev K.A., Shestakov N.V., Bakhtiarov V.F., Kusonsky O.A., Zagretidinov R.V., Zherebtsov G.A. Toward the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of “Chelyabinsk” meteorite fall according to the data from coherent radar, GPS, and seismic networks. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015a, vol. 120, no. 12, pp. 10,754–10,771. DOI: [10.1002/2015JA021549](https://doi.org/10.1002/2015JA021549).

Berngardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyy A.V. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015b, vol. 132, pp. 106–115. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.004).

Berngardt O.I., Perevalova N.P., Podlesnyy A.V., Kurkin V.I., Zherebtsov G.A. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. vol. 122, no. 4, pp. 4736–4754. DOI: [10.1002/2016JA023511](https://doi.org/10.1002/2016JA023511).

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017. vol. 15, no. 2. pp. 418–429. DOI: [10.1002/2016sw001593](https://doi.org/10.1002/2016sw001593).

Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Gerrard A.J., Miller E.S., West M.L. Sources and characteristics of medium scale traveling ionospheric disturbances observed by high frequency radars in the North American sector. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, no. 4, pp. 3722–3739. DOI: [10.1002/2015ja022168](https://doi.org/10.1002/2015ja022168).

Givishvili G.V., Leshchenko L.N. Spatiotemporal parameters of anomalous reflections from the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017, vol. 57, no. 4, pp. 434–441. DOI: [10.1134/S0016793217040077](https://doi.org/10.1134/S0016793217040077).

Golikova E.V., Kunitsyn V.E., Matveyev A.S., Nesterov I.A. Modeling of radio signal reflection from stratified atmosphere and ionosphere. *Radiotekhnika i elektronika* [J. of Communications Technology and Electronics]. 2005, vol. 50, no. 7, pp. 794–804. (In Russian).

Haldoupis C.I., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height–time–intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, no. 3–5, pp. 539–557. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.03.020).

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, no. 9, pp. 917–940. DOI: [10.1007/s00585-996-0917-6](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0917-6).

Jiang Chunhua, Yuannong Zhang, Guobin Yang, Zhu Peng, Sun Hengqing, Cui Xiao, Song Huan, Zhao Zhengyu. Automatic scaling of the sporadic E layer and removal of its multiple reflection and backscatter echoes for vertical incidence ionograms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 129, suppl. C, pp. 41–48. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.04.005).

Kozlovsky A., Turunen T., Ulich T. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auro-

ral ionosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, no. 8, pp. 5265–5276. DOI: [10.1002/jgra.50474](https://doi.org/10.1002/jgra.50474).

Kurkin V.I., Laryunin O.A., Podlesny V., Pezhemskaya M.D., Chistyakova L.V. Studying morphological characteristics of traveling ionospheric disturbances with the use of near-vertical ionospheric sounding data. *Atmos. Ocean. Optics.* 2014, vol. 27, no. 4, pp. 303–309. DOI: [10.1134/S1024856014040095](https://doi.org/10.1134/S1024856014040095).

Liu J.-Y., Chen Ch.-H., Lin Ch.-H., Tsai H.-F., Chen Ch.-H., Kamogawa M. Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2011, vol. 116, no. A6, A06319. DOI: [10.1029/2011ja016761](https://doi.org/10.1029/2011ja016761).

Lobb R.J., Titheridge J.E. The effects of travelling ionospheric disturbances on ionograms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1977, vol. 39, pp. 129–138. DOI: [10.1016/0021-9169\(77\)90106-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(77)90106-4).

Maruyama T., Tsugawa T., Kato H., Saito A., Otsuka Yu., Nishioka M. Ionospheric multiple stratifications and irregularities induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets, and Space.* 2011, vol. 63, pp. 869–873. DOI: [10.5047/eps.2011.06.008](https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.008).

Maruyama T., Yusupov K., Akchurin A. Interpretation of deformed ionograms induced by vertical ground motion of seismic Rayleigh waves and infrasound in the thermosphere. *Ann. Geophys.* 2016a, vol. 34, no. 2, pp. 271–278. DOI: [10.5194/angeo-34-271-2016](https://doi.org/10.5194/angeo-34-271-2016).

Maruyama T., Yusupov K., Akchurin A. Ionosonde tracking of infrasound wavefronts in the thermosphere launched by seismic waves after the 2010 M8.8 Chile earthquake. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016b, vol. 121, no. 3, pp. 2683–2692. DOI: [10.1002/2015ja022260](https://doi.org/10.1002/2015ja022260).

Naumenko A.A., Podlesny A.V. Modernization of transmission and receiving facilities of chirp sounding network. *Mezhdunarodnaya Baikalskaya molodezhnaya nauchnaya shkola po fundamentalnoi fizike. Trudy XV konferentsii molodykh uchenykh.* [Proc. Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics. XV Young Scientists' Conference]. 2017, pp. 279–281. (In Russian).

Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G.M. New digisonde for research and monitoring applications. *Radio Sci.* 2009, vol. 44, no. 1, RS0A24. DOI: [10.1029/2008rs004115](https://doi.org/10.1029/2008rs004115).

Pignalberi A., Pezzopane M., Rizzi R., Galkin I.A. Effective solar indices for ionospheric modeling: a review and a proposal for a real-time regional IRI. *Surv. Geophys.* 2018, vol. 39, no. 1, pp. 125–167. DOI: [10.1007/s10712-017-9438-y](https://doi.org/10.1007/s10712-017-9438-y).

Podlesny A.V. Chirp receiver using program systems. *Mezhdunarodnaya Baikalskaya molodezhnaya nauchnaya shkola po fundamentalnoi fizike. Trudy XV konferentsii molodykh uchenykh.* [Proc. Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics. XV Young Scientists' Conference]. 2017, pp. 200–202. (In Russian).

Ponyatov A.A., Uryadov V.P., Ivanov V.A., Cherkashin Yu.N., Chernov A.G., Shumakov V. Oblique chirp sounding of the modified ionosphere. Experiment and simulation. *Radiophys. Quant. Electron.* 1999, vol. 42, no. 4, pp. 269–277. DOI: [10.1007/bf02677569](https://doi.org/10.1007/bf02677569).

Toffoli T., Margolis N. Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling. Cambridge, MIT Press, 1987, 276 p.

Uryadov V.P., Kurkin V.I., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Ponomarchuk S., Ponyatov A.A. Features of propagation of HF signals on mid-latitude paths under conditions of geomagnetic disturbances. *Radiophys. Quant. Electron.* 2004, vol. 47, no. 12, pp. 933–946. DOI: [10.1007/s11141-005-0035-4](https://doi.org/10.1007/s11141-005-0035-4).

Как цитировать эту статью

Бернгардт О.И., Бубнова Т.В., Подлесный А.В. Автоматическая оценка динамики ионосферных неоднородностей с временами жизни 1–15 минут по данным скоростного ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН. *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 1. С. 76–84. DOI: [10.12737/szf-41201807](https://doi.org/10.12737/szf-41201807).